



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

도시계획학 석사학위논문

포탄 사격장 토양의 RDX에 의한
인근 하천 오염 예측

2017년 2월

서울대학교 환경대학원
환경계획학과 환경관리학전공
박 정 태

포탄 사격장 토양의 RDX에 의한 인근 하천 오염 예측

지도교수 이 동 수

이 논문을 도시계획학 석사학위 논문으로 제출함
2016년 10월

서울대학교 환경대학원
환경계획학과 환경관리학 전공
박 정 태

박정태의 도시계획학 석사학위 논문을 인준함
2016년 12월

위 원 장 _____ (인)

부위원장 _____ (인)

위 원 _____ (인)

국문초록

최근 포탄사격으로 인하여 생기는 화약물질 오염이 중요하게 대두되고 있다. 화약물질 중 주로 쓰이는 물질은 RDX이다. RDX는 폭발 시 불완전 산화 되거나 불발탄으로 인하여 토양 내에 유입된다. 토양에 축적된 화약물질은 강우 시 물에 용해되거나 침식된 토양입자에 흡착되어 하천으로 이동할 가능성이 있다. 이렇게 이동한 RDX는 토양 및 수중 미생물 및 동식물을 포함하는 생태계에 피해를 줄 수 있다.

본 연구의 목적은 첫째, 연구지인 안월천 유역내의 피탄지 토양의 RDX 오염과 피탄지에서 유출된 RDX에 의해 인근 하천인 안월천과 임진강의 취수지역이 오염된 정도를 시공간의 함수로서 예측하는 것이다. 둘째, 피탄지에서 안월천으로 RDX의 이동경로를 파악하여 RDX의 이동저감을 위한 기초자료를 제공하는 것이다. 따라서 강우에 의한 RDX의 다매체 오염도 변화를 예측할 수 있는 다매체 모형을 개발하였다. RDX의 증기압과 헨리상수가 낮은 물리화학적 특성을 감안하여 매질의 범위를 대기를 제외한 토양, 수체, 저토로 한정하였다. 모형의 예측 결과 분석은 5단계로 진행하였다. 첫째, 배출유무와 주변셀의 영향 유무에 따라 구분된 3가지 토양의 1년간 농도변화를 비교하여 배출, 강우조건과 농도와의 연관성을 분석하였다. 둘째, 60년간 토양, 수체, 저토 오염농도의 최대값, 평균값, 최소값을 확인하여 변화경향을 분석하였다. 셋째, 강우사상에 따른 강우유출속도와 토양, 수체의 RDX농도 분포를 분석하였다. 넷째, 60년간 다매체 전체, 각 매체별 RDX의 유입, 유출(제거)율을 분석하고 주요 제거기작을 분석하였다. 마지막으로 결과적으로 정수장에 영향을 미치는 임진강의 마지막 구획을 포함한

10개의 구획의 수체 농도를 RDX의 환경기준과 비교, 분석하였다.

첫째, 매체별 RDX 오염농도는 강우사상의 영향을 받으며, 강우량이 많을수록 토양의 오염도는 낮아지며, 수체의 오염도는 높아지는 경향을 보인다. 둘째, 60년간 토양, 수체, 저토 농도는 축적되는 경향을 보이지 않았다. 셋째, 사격장 피탄지에서 안월천으로 흘러들어가는 RDX는 하천 생태계에 유해한 영향을 줄 수 있다. 넷째, 임진강의 큰 유량으로 인하여 RDX의 거동이 취수장 주변 수체에 주는 영향은 낮다. 만약 본 연구지가 아닌 다른 피탄지 주변에 안월천과 유사한 규모의 지천이 있으며 그 주변에 주민이 거주하고 있다면 영향을 무시할 수 없을 것이라 판단되며, 본 연구에 개발된 모형과 평가방법이 적용될 수 있으리라 기대된다.

주요어 : RDX, 포탄사격장, 토사유실, 지표유출

학 번 : 2015-24823

<목차>

I. 서론	1
1. 연구의 배경 및 목적	1
2. 연구의 방법 및 범위	2
1) 연구 방법	2
2) 연구 범위	4
II. 문헌 고찰	6
1. RDX의 물리화학적 특성 및 독성	6
1) RDX의 물리화학적 특성	6
2) RDX의 독성	8
2. 사격장 피탄지 내 RDX 오염	10
3. 다매체 거동모델의 개념과 현황	12
III. 모형 개발	13
1. 개발된 다매체 모형의 원리	13
1) 환경 매체	13
2) 물질수지 방정식	15
3) 매체별 반영 기작	16
2. 토사유실과 지표유출량 산출	20

1) 토사유실량 산출	20
2) 지표유출량 산출	32
3. 입력자료의 구축	34
1) 구축자료의 목록	34
2) 초기조건	38
3) 배출량 추정	39
 IV. 결과 및 고찰	41
1. 기상 분석	41
2. 모형예측의 신뢰도	42
3. 매체별 오염도의 시·공간적 변화 예측 및 분석	46
4. 60년간 다매체 내 RDX 유출·입 비율	57
5. 수체농도와 RDX 건강권고치, EMPC와의 비교	59
 V. 결론	61
1. 결론	61
2. 연구의 한계와 추후 연구의 필요성	62
 ■ 참고문헌	63
부록 1. 식생피복인자 값	69
부록 2. 임진강과 안월천 합류지점 오염농도와 EPA건강권고치의 비교	70

<표 차례>

<표 2-1> TNT와 RDX의 물리화학적 특성	7
<표 2-2> 미국 EPA의 화약물질에 대한 건강 권고치	9
<표 2-3> 외국 사격장의 RDX 토양오염 현황	11
<표 3-1> 토양 내 거동기작	17
<표 3-2> 수체 내 거동기작	18
<표 3-3> 저토 내 거동기작	19
<표 3-4> 1년간 독립 강우사상의 강우인자 값(1981년 기준)	22
<표 3-5> 정밀토양도의 토양구분과 토양침식 인자(K) 값	23
<표 3-6> 사면의 경사에 따른 지수 m	28
<표 3-7> 토지 이용 및 보전 관리 방법에 따른 침식조절인자 값(P) ..	29
<표 3-8> 토양유실량 각 인자별 값	31
<표 3-9> 선행토양함수조건	33
<표 3-10> 도시지역의 유출곡선번호	33
<표 3-11> 활용된 디지털 지도	34
<표 3-12> 모델링을 위한 연구지의 지역적 범위	34
<표 3-13> RDX 배출 토양 셀 번호	40
<표 4-1> 사격장 피탄지 토양 RDX농도 측정치와 예측치의 검증결과	44
<표 4-2> 측정치와 예측치의 계절별, 연별 유의수준	45
<표 4-3> 3개년 토양, 수체, 저토의 1년 오염농도 최대값, 평균값.	47
<표 4-4> 60년간 매체별 셀 평균값의 최대값, 평균값, 최소값.	49
<표 4-5> 강우사상 분류 기준.	52

〈그림 차례〉

<그림 1-1> 연구지의 위치	5
<그림 2-2> 국내 사격장의 RDX 토양오염 현황	11
<그림 3-1> 토양, 수체, 저토 모델 도표	13
<그림 3-2> 연구지 구획(흰색 : 토양, 푸른색 : 수체)	14
<그림 3-3> 토양침식인자(K)값 산출	24
<그림 3-4> 피탄지 내 피복분류	26
<그림 3-5> 지형인자(LS)값	28
<그림 3-6> 침식조절인자(P)값	30
<그림 3-7> Sink가 보정된 피탄지 유역 DEM	35
<그림 3-8> 흐름방향 정의 실행	36
<그림 3-9> 피탄지 유역 내 지표수 유출 방향	37
<그림 3-10> 피탄지 내 RDX배출 위치	40
<그림 4-1> 60년간 강우량, 토사유실량, 지표유출량 변화	41
<그림 4-2> 측정치(눈금선 왼쪽)와 예측치(눈금선 오른쪽)의 비교	44
<그림 4-3> 1년 동안의 셀별 강우량, 토양 RDX농도 변화	48
<그림 4-4> 1년 동안의 강우량, 수체, 저토 RDX농도 변화(711번)	48
<그림 4-5> 60년 동안의 토양농도(배출량 有) 변화	50
<그림 4-6> 60년 동안의 토양농도(배출량 無) 변화	50
<그림 4-7> 60년 동안의 수체농도 변화	51
<그림 4-8> 60년 동안의 저토농도 변화	51
<그림 4-9> 경로별 강우유출속도, 토양/수체농도의 분포 (누적강우량 0mm)	53
<그림 4-10> 경로별 강우유출속도, 토양/수체농도의 분포 (누적강우량 5.58mm)	54
<그림 4-11> 경로별 강우유출속도, 토양/수체농도의 분포 (누적강우량 32.127mm)	55
<그림 4-12> 경로별 강우유출속도, 토양/수체농도의 분포 (누적강우량 60.289mm)	56
<그림 4-13> 다매체 내 RDX 유입(배출), 유출(제거)비율	58
<그림 4-14> 안월천 RDX농도와 건강권고치, EMPC와의 비교	60
<그림 4-15> 수체로 오염물질이 유입되는 토양구획	60

I. 서론

1. 연구 배경 및 목적

최근 군사훈련 중 포탄사격 간 생기는 화약물질로 인한 토양, 수질 오염이 중요하게 대두되고 있다. 예를 들어 2009년 국방부 국정감사 질의에서 사격장 주변에 화약물질과 중금속 등의 오염물질이 축적되어 있으며 이는 토양 및 지하수 오염을 야기하기 때문에, 철저한 환경오염 피해 및 현황조사가 필요하다고 언급하였다(김영우, 2009).

포탄 내 혼합 화약물질은 기폭장치에 의해 점화되어 포탄을 터지게 하는 역할을 하며 그 중 주로 쓰이는 물질은 Composition B이다. Composition B는 TNT(TriNitroToluene) 40%, RDX(Royal Demolition eXplosive) 60%으로 혼합되어 있다(Pichtel, 2012). TNT와 RDX는 폭발 시 불완전 산화 되거나 불발탄으로 인하여 토양 내에 유입된다(Brannon & Pennington, 2002). 토양에 축적된 화약물질은 강우 시 물에 용해되거나 침식된 토양입자에 흡착되어 하천으로 이동할 가능성이 있다. 이렇게 이동한 RDX는 토양 및 수중 미생물, 무척추동물 및 동식물을 포함하는 생태계에 피해를 줄 수 있다(Abadin *et al*, 2012).

2002년 국방부에서 실시한 ‘사격장 토양오염조사 및 오염확산 방지대책 연구 용역 결과, 포탄 사격장 피탄지에서 화약물질의 오염이 0.15~177.9mg/kg범위로 높게 나타난 것으로 확인되었다(국방부, 2002). 이와 같은 실태에도 불구하고 복원 및 기타 대책 마련에는 많은 제한이 있는데 군사제한구역의 보안문제, 피탄지 내 존재하는 불발탄의 위험성, 1년 내내 이루어지는 훈련으로 인한 부지 전용(轉用)¹⁾의 제한 등이 있다.

포탄 사격장 피탄지에서의 화약물질에 대한 연구 또한 제한적인 범위에서 이루어져 왔다. 군 사격장 토양오염에 대한 정밀조사 자료가 부족하며, 오염물질 분포와 거동에 대한 정보 역시 부족하다. 그리고 화약물질 오염은 다매체에 걸쳐 피해를 줄 수 있지만 토성에 따른 화약물질 분

1) 예정되어 있는 곳에 쓰지 아니하고 다른 데로 돌려서 씀.

포(배범한 등, 2014)와 토사유실과 화약물질의 이동 상관성(공효영 등, 2012), 수체 내 화약물질의 거동(윤혜인, 2002)등 단일매체 중심으로 연구가 이루어져 왔다.

본 연구는 오염데이터가 존재하는 포탄사격장 피탄지를 대상으로 선정하여 포탄사격훈련에 따른 오염영향을 다루고자 한다. 피탄지는 임진강의 취수장과도 가까워 인근 주민들에 대한 영향이 우려된다. 군은 이 영향을 파악하고 있어야 하며, 지자체에도 인지시켜 주민들에 대한 영향을 최소화시키는 데 앞장서야 한다.

따라서 본 연구의 목적은 첫째, 안월천 유역내의 피탄지 토양의 RDX 오염과 피탄지에서 유출된 RDX에 의해 인근 하천인 안월천과 임진강의 취수지역이 오염된 정도를 시공간의 함수로서 예측한다. 둘째, 피탄지에서 안월천으로 RDX의 이동경로를 파악하여 RDX의 이동저감을 위한 기초자료를 제공하는 것이다.

이러한 연구를 통하여 이제껏 연구되어왔던 단일매체에서의 RDX 거동 특성이 아닌 다매체에서의 RDX 거동특성을 알 수 있을 것이다. 그리고 각 매체의 RDX농도의 공간적 분포를 예측함으로써 토양과 수체의 오염농도를 종합적으로 파악할 수 있을 것이다.

2. 연구 방법 및 범위

1) 연구방법

본 연구에서는 강우에 의하여 시공간적으로 변하는 RDX의 다매체 오염도를 산정할 수 있는 다매체 모형을 개발하였다. 이 모형은 모두 3개의 하위 모형으로 구성되어 있으며, 하위모형에는 Digital Elevation Model(DEM)정보에 근거하여 8방향 중 가장 경사도가 큰 방향으로 물의 흐름이 이동한다는 원리를 적용하여 토양 내에서의 흐름방향을 정하는 모형, 강우조건에 따라 변하는 토사유실량과 지표유출량을 산정하는 모형, 각 매체의 시공간적인 오염도를 산정하는 모형으로 이루어져 있다. 각각의 하위모형은 개별 작업이 가능하도록 모듈화 하였다.

피탄지에 낙하되는 포탄에 의한 RDX의 토양 배출량 산정을 위해서

포탄 내 화약물질 함량, 화약물질 잔류율, 1일 사격 발수를 고려하여 나온 1일 배출량을 모형에 반영하였다. 유량은 임진강의 유량은 국가수자원관리종합정보시스템(WAMIS, Water Management Information System [www.wamis.go.kr])의 연천군(필승교) 관측소의 일유량 자료를 활용하였으며(2010년 기준), 안월천의 경우 하천유량에 대한 실측치가 없기 때문에, 강우량에 따라 하천유량에 영향을 주도록 가정하였다. 하지만 강우가 없을 때에도 하천의 흐름은 존재하기 때문에 최소 유량을 설정하여 안월천이 흐른다고 가정하였다. 최소유량은 군남홍수조절지 환경영향평가서에서 산정한 안월천의 유량을 이용하였으며 해당 값은 $0.016\text{m}^3/\text{sec}$ 이다. 기상자료에 활용하기 위하여 CORDEX (COordinated Regional Climate Downscaling EXperiment) East Asia (<https://cordex-ea.climate.go.kr/>)의 3시간 해상도의 강우량과 기온자료를 사용하였다.

시간 해상도는 1시간 단위이며, RDX는 토양에서는 고도가 높은 쪽에서 낮은 곳으로, 수체에서는 상류에서 하류로 이동하며, 임진강의 취수장까지는 확산으로 이동하는 것으로 가정하였다.

모형을 통하여 산출한 예측값이 현실을 반영하는지 평가하기 위해 예측치와 수자원공사에서 2005년~2008년에 측정한 토양오염농도를 비교하여 분석하였다. 검증방법은 비모수 검정 중에서 맨-휘트니(Mann Whitney) 검정 방법을 적용하였다.

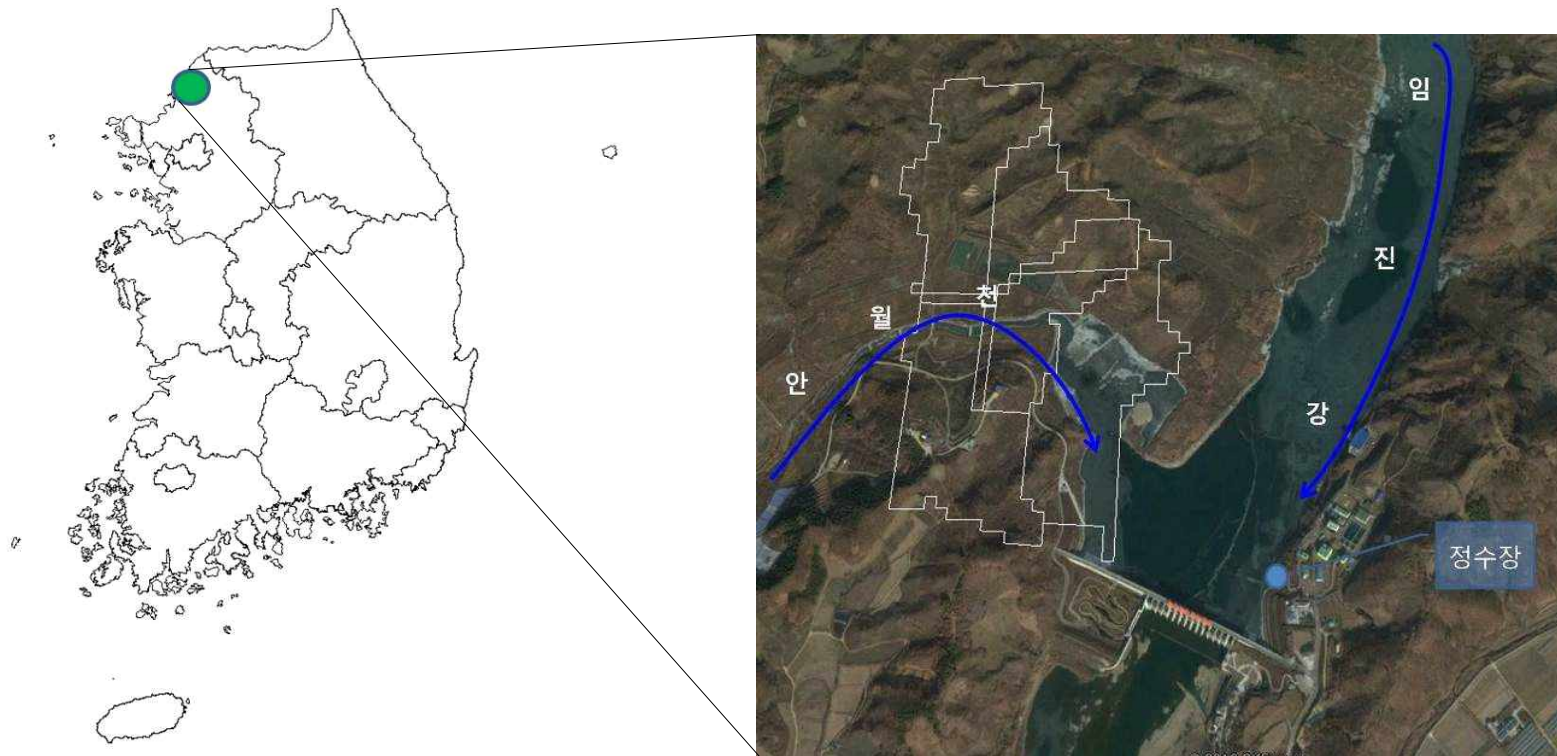
모형의 예측 결과 분석은 5단계로 진행하였다. 첫째, 배출유무와 주변 셀의 영향 유무에 따라 구분된 3가지(1. 배출 有, 주변 셀 영향 無 토양, 2. 배출 有, 주변 셀 영향 有 토양, 3. 배출 無, 주변 셀 영향 有 토양) 토양의 1년간 농도변화를 비교하여 배출, 강우조건과 농도와의 연관성을 분석하였다. 둘째, 60년간 토양, 수체, 저토 오염농도의 최대값, 평균값, 최소값을 확인하여 변화경향을 분석하였다. 셋째, 강우사상에 따른 강우 유출속도와 토양, 수체의 RDX농도 분포를 분석하였다. 넷째, 60년간 다매체 전체, 각 매체별 RDX의 유입, 유출(제거)율을 분석하고 주요 제거기작을 분석하였다. 마지막으로 결과적으로 정수장에 영향을 미치는 임진강의 마지막 구획을 포함한 10개의 구획의 수체 농도를 RDX의 환경기준과 비교, 분석하였다.

2) 연구범위

모형연구의 공간적 범위는 연천군 왕징면에 위치한 안월천 유역 내 포탄사격장(마방사격장) 피탄지와 안월천, 군남홍수조절댐이 맞닿아 있는 임진강의 일부이다(<그림 1-1> 참조). 안월천은 지방 2급 하천으로서 유역면적은 $15,79\text{km}^2$ 이며, 유로연장은 12.56km 에 달한다. 유역 중 사격장 피탄지 면적은 0.75km^2 이며, 안월천 유역의 4.7%를 차지한다. 안월천 유역에서 발원된 강물은 피탄지를 지나며 최종적으로 임진강과 합류된다.

2011년 준공된 군남홍수조절댐의 영향으로 수위가 34m으로 높아짐에 따라 임진강 유역 중 12.09km^2 의 면적이 수몰되며, 강우 시 사격장의 강우 유출 및 토사유실로 인하여 임진강이 오염될 우려가 있다. 군남홍수조절댐 인근에 위치하고 있는 연천 취수장은 평균 취수량이 $31,482\text{m}^3/\text{일}$ 이며, 취수된 물은 정수장에서 평균 급수량 $29,983\text{m}^3/\text{일}$ 으로 급수된다(한국수자원공사, 2005). 급수구역은 연천읍, 전곡읍, 군남면, 청산면, 백학면, 미산면, 왕징면, 신서면, 중면, 장남면으로 2015년 9월 말 기준, 38,241명에 달한다(연천군, 2015). 시간적 범위는 사격장이 건설된 1957년부터 2016년 현재까지이다.

사격장 정밀조사 결과 RDX는 측정장소 36곳 중 30곳에서 검출되었으며 최대치는 57.085mg/kg 이었다(한국수자원공사, 2005). 반면, TNT는 16곳에서 검출되었고 최대치는 0.147mg/kg 으로 TNT에 비해 RDX의 오염정도가 심하다고 판단되어 연구대상 물질을 RDX로 선정하였다.



<그림 1-1> 연구지의 위치(경기도 연천군 왕징면 포탄사격장 피탄지)
 (파란 화살표 : 강물 흐름 방향, 흰테두리 : 피탄지, 파란점 : 정수장 취수구)

II. 문헌 고찰

1. RDX의 물리화학적 특성과 독성

1) RDX의 물리화학적 특성

RDX(hexahydro-1,3,5-trinitro-1,3,5-triazine)는 물리적 자극에 쉽게 반응하지 않으나 폭발력은 우수한 특징을 가지고 있다.

RDX는 배출되어 대기, 수체, 토양으로 분배된다(U.S. Army, 1987). 분배된 후 입자상으로 토양에 축적 되어 있다가 지표수 및 지하수로 운송된다(U.S. Army, 1987). 수체 내에서 RDX의 확산계수는 $7.15 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{sec}$ 이다(Center, 2013). RDX의 증기압은 $1.33 \times 10^{-7} \text{ Pa}$, 헨리상수는 $2.02 \times 10^{-6} \text{ Pa m}^3/\text{mol}$ 으로 매우 낮아서 휘발과정은 느릴 것으로 예상된다(Lyman et al., 1982)(표 <2-1> 참조). 대기 중에서는 입자 상태로 존재할 것으로 예상된다. 수체 내에서 주로 광분해가 주요 분해과정이며(반감기 9~13시간)(U.S. Army, 1986), 생분해는 주로 혐기성 조건하의 수체와 토양에서 일어난다(Pennington and Brannon, 2002).

RDX의 유기탄소 함량(Koc)로 표준화된 토양흡착계수는 42~167이다(U.S. Army, 1980b). 그리고 Log Kow(옥탄올-물 분배계수)와 Log Koc(유기탄소-물 분배계수)의 관계의 연구결과를 반영하여 RDX의 Koc를 구한 값은 7.07로 계산되었다(Ariyaratna et al, 2015).

$$\text{Log Koc} = 0.00028 + (0.983 * \text{Log Kow})$$

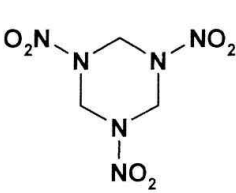
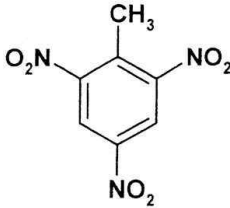
이러한 Koc값은 토양에서의 이동성이 높다는 것을 나타낸다(Swann et al., 1983). 따라서 RDX는 지하수로 침출될 수 있을 것으로 예상된다. 실험 데이터는 RDX가 토양에 쉽게 결합되지 않는다는 것을 보여준다(U.S. Army, 1985). RDX가 침전물에 크게 흡착하지는 않지만 유기물질

이나 점토함량이 증가하면 흡착이 증가한다(U.S. Army, 1980a). 점토 함량은 유기물질보다 RDX의 흡착에 대한 영향이 크다(U.S. Army, 1980a).

흡착상수는 유기탄소와 점토함량, pH 및 양이온 교환 용량과 같은 토양 특성의 조합과 선형적으로 관련되어 있다(U.S. Army, 1993). 미 육군 공병대(1999)에서 RDX의 흡착상수를 측정한 결과 $0.21 \sim 0.33 \text{ L kg}^{-1}$ 으로 측정되었다.

옥탄올/물 분배 계수(log Kow)는 화합물의 잠재적인 생체 축적에 대한 유용한 예비지표이다. RDX의 log Kow는 0.87 (PHYSPROP, 2009)로 추정되기 때문에 수생생물에 대한 축적 가능성은 낮다고 볼 수 있다(표 <2-1> 참조). 블루길, 메기, 피라미에 대한 RDX의 생물 농축 계수(Bioconcentration factor)는 각각 1.9-6.4, 1.2-5.5, 1.4-5.9배이다(U.S. Army, 1984a)²⁾.

<표 2-1> TNT와 RDX의 물리화학적 특성

	RDX	TNT
구조식		
CAS 번호	121-82-4	118-96-7
Log Kow	0.87	1.60
용해도 (mg/L, 25℃)	59.7	115.0
증기압 (Pa)	1.33×10^{-7}	7.80×10^{-3}
헨리상수 (Pa m ³ /mol)	2.02×10^{-6}	3.70×10^{-7}

출처 : Abadin *et al*, 2012, Benoit, 2004

2) BCF(Bioconcentration factor) = 생체 내의 오염물질 농도 / 수환경 내의 오염물질 농도, 식물 플랑크톤의 경우 카드뮴 농축계수가 900~5,500이라고 했을 때 RDX의 수치는 낮은 수준이다.

2) RDX의 독성

(1) 급성 독성

RDX에 노출된 사람들에게 신경성 재발성 대발작(일반적으로 경련 중에 의식소실과 이에 동반된 온몸의 근육경직, 근육의 규칙적인 움직임 등이 동반되는 경우)이 발생하였고, 섭취 후 단백뇨를 동반하여 신 세뇨관(신장에서 요의 생성에 관여하는 관)이 손상되었다는 보고가 있었다(Stone *et al*, 1969). 또한 섭취 후 간 기능 검사 지표인 AST(alanine transferase), ALT(alkaline phosphatase)³⁾가 상승하였으며, 소화노출 후 복통과 전신쇠약이 보고 되기도 하였다(KüçükardalI *et al*, 2003).

(2) 만성 독성

암컷 생쥐에서 간세포 선종과 암 종의 발생률이 증가하였으며(EPA, 2000), 오염된 흙에 노출시킨 포유동물 세포내에서 돌연변이 유발확률이 높아졌다는 보고 자료가 있다(Berthe-Corti *et al*, 1998). EPA는 RDX를 발암물질 C급으로 분류하고 있으며 RDX를 섭취하였을 때 동물이 암에 걸릴 증거가 제한적으로 존재하며, 인체에서의 발암증거는 불충분할 때 C급으로 분류된다(NTP, 2002). 그러나 쥐에 대한 반복적인 투입에도 불구하고 장기 및 조직 내 축적 가능성은 낮다(ACGIH, 2001).

3) 수치가 높을수록 간 손상의 가능성이 높다.

(3) RDX의 건강 권고치

국내 하천 수질환경 기준 및 규제기준에는 화약물질이 포함되어 있지 않다. 그래서 미국 EPA에서 지정한 화약물질에 대한 건강 권고치 Drinking Water Equivalent Level(DWEL), cancer risk를 임진강 취수장 인근의 RDX 수체 농도와 비교하고자 한다.⁴⁾ DWEL는 화약물질이 식수를 통하여 노출된다고 가정 하였을 때, 평생 인간의 건강에 유해한 결과가 나타나지 않는 농도를 의미한다. RDX의 경우 1L당 0.1mg이상 섭취할 때 해로운 결과가 발생할 가능성이 있다(NTP, 2002). cancer risk는 10,000명이 화약물질에 평생 노출되었다고 가정하였을 때, 그 중 1명에서 암이 발생하는 것에 대응하는 음용수 내의 화약물질의 농도를 말하며 RDX가 포함된 물 1L당 0.03mg이상을 섭취하였을 때 추가발병확률이 10^{-4} 을 초과한다(NTP, 2002)(<표 2-2> 참조).

<표 2-2> 미국 EPA의 화약물질에 대한 건강 권고치

물질명	DWEL (mg/L)	mg/L at 10^{-4} cancer risk
RDX	0.1	0.03

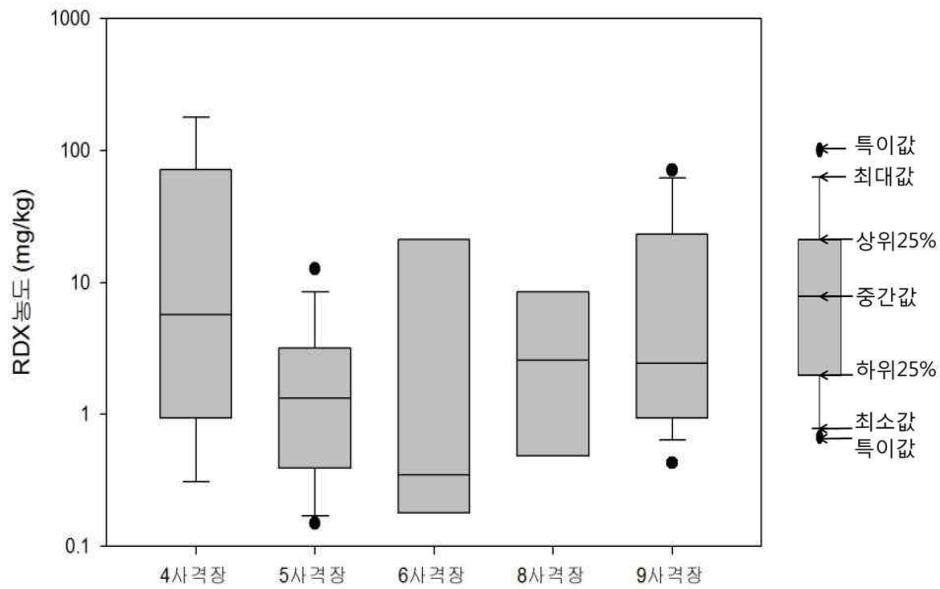
출처 : NTP, 2002

4) DWEL과 cancer risk 이외에 RfD(Reference Dose : 평생 섭취하였을 때 인간의 건강에 식별될만한 위해가 발생하지 않는 1일 경구섭취량, 단위 mg/kg/d)가 있지만 직접적인 비교가 어려워 제외하였다.

2. 사격장 피탄지 RDX 오염

국방부에서는 2002년 육·해·공군에서 사용 중인 9개의 사격장을 대상으로 토양오염을 조사하였으며, 사격장 토양에 존재하는 오염물질은 주로 TNT(2,4,6-trinitrotoluene), RDX(hexahydro-1,3,5-triazine) HMX(octahydro-1,3,5,7-tetranitrotetrazocine)와 같은 화약물질과 Cu, Pb, Cd 등 중금속으로 확인되었다. 이중 육군에서 사용하고 있는 4, 5, 6, 8, 9사격장에서 화약물질의 오염이 확인되었다. 6사격장을 제외하고는 모두 TNT보다는 RDX가 주된 오염물질로 검출되었으며 피탄지에 오염 농도가 높게 검출되었다. RDX오염농도는 사격장 측정치를 모두 포함하여 0.15~177.9mg/kg 범위를 보였다(국방부, 2002)(<그림2-1> 참조). 반면 외국(미국, 캐나다)의 사격장 피탄지 내 오염정도는 국내보다 심각한 수치를 보였으며, 특히 뉴 멕시코 주에 위치한 Fort Bliss에서는 678mg/kg까지 측정되었다(<표2-3> 참조).

화약물질과 중금속으로 오염된 범위는 주로 표토이며, 오염된 표토는 강우 시 표면유출로 하천으로 운반되는 것으로 확인되었다(박석호 등, 2008). 한탄강 댐 건설 후 만들어진 가상 저수지를 대상으로 한탄강 유역내의 사격장에 대한 화약류 유입 경로를 분석하기 위하여, 가상 저수지의 화약류에 의한 수질오염 영향을 분석하였다. 그 결과 현재의 오염정도가 지속될 경우 화약물질이 수생태계에 미치는 영향은 적을 것으로 판단하였다(윤혜인, 2002).



<그림 2-1> 국내 사격장의 RDX 토양오염 현황(국방부, 2002)

<표 2-3> 외국 사격장의 RDX 토양오염 현황

장소(주)		오염농도(평균)	참고문헌
Fort Hood(Texas)		323 mg/kg	Pennington <i>et al.</i> (2006)
CFB Petawawa (Ontario, Canada)		2.4mg/kg	
Yakima Training Center (Washington)		54mg/kg	Pennington <i>et al.</i> (2002)
Fort Bliss(New Maxico)		678mg/kg	
Fort Greely (Alaska)	81mm 박격포	0.9mg/kg	Walsh <i>et al.</i> (2001)
	2.75inch 로켓	340mg/kg	
Fort Lewis(Washington)		<10mg/kg	US Environmental Protection Agency(1994)

3. 다매체 거동모델의 개념과 현황

환경 중 오염물질의 농도는 다양한 여러 기작들의 상호과정의 결과로 나타나기 때문에 매체 간 오염물질의 이동과 변화를 나타내기 위해 질량보존법칙에 기초한 ‘다매체 거동모델(Multimedia fate model)’을 이용한다(신용승 등, 2004).

이 다매체 거동모델을 개발하기 위해서 다양한 입력자료와 매개변수, 그리고 매체 간의 이동과정에 대한 수식이 필요하다. 일반적인 다매체 거동모델에서 고려되어야 할 요소는 환경매체(대기, 수체, 토양, 저토)와 입력자료(물리·화학적 특성값, 매체·기상·배출특성인자), 거동기작(매체 내·간) 등이 있다(Mackay *et al.*, 2001).

외국에는 평가목적에 맞게 다양한 다매체 거동모델에 관한 연구가 이루어지고 있다. 지금까지는 폴리염화비페닐류(PCBs), 다이옥신류(PCDD/Fs), 다환방향족탄화수소류(PAHs) 등 유기화학물질에 국한되어 개발되어왔으나, 중금속까지 대상물질을 연구하고 있으며, 지역적으로도 국지적 규모에서 전 지구적 규모로 개발되어지는 추세이다(신용승 등, 2004).

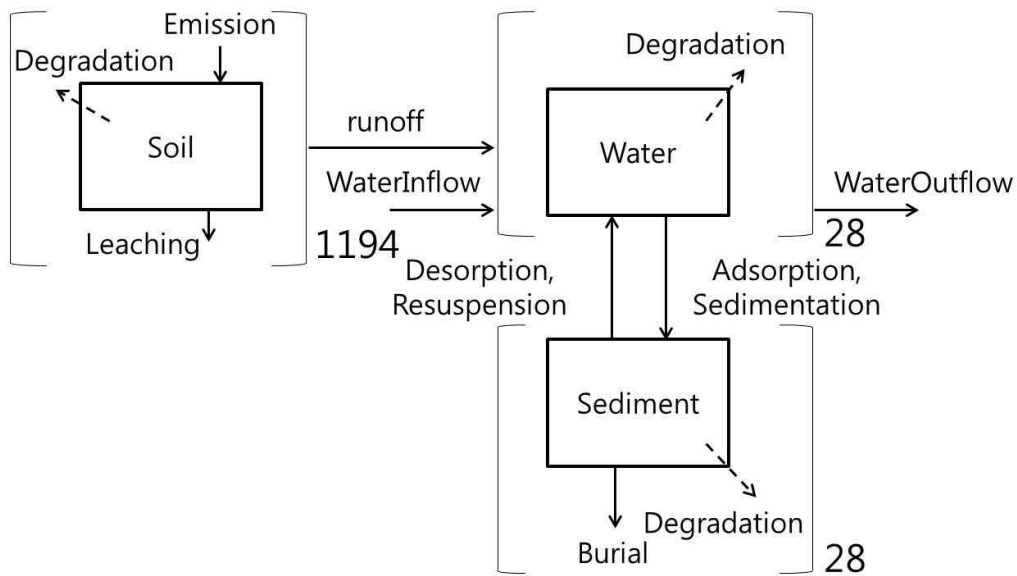
최근 국내에서도 최근 유해화학물질의 노출 및 위해성 평가 등 요구에 따라 다매체 모델에 대한 관심도가 증가하고 있다. 2002년 UNEP의 잔류독성유해화학물질에 관한 보고서에는 국내 다매체 거동 모델로 POPsME, EDCSeoul, ECO2등이 소개되어 있다(UNEP, 2002).

Ⅲ. 모형 개발

1. 개발된 다매체 모형의 원리

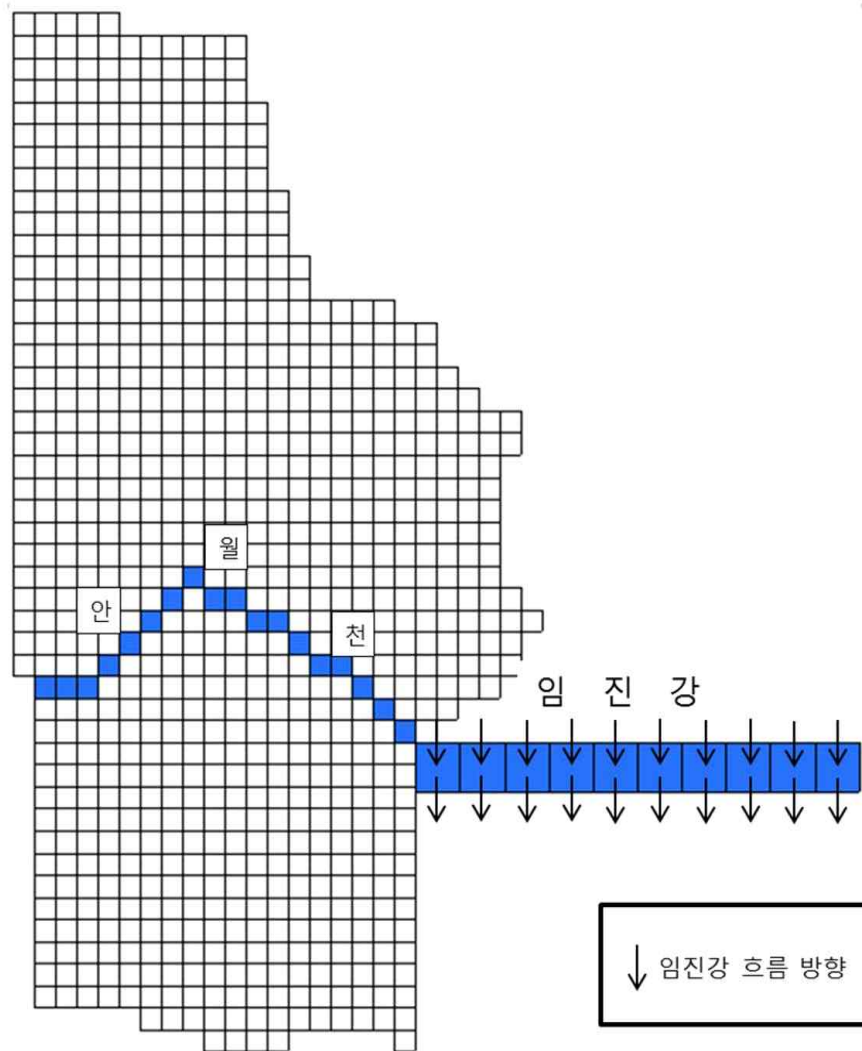
1) 환경 매체

RDX의 증기압과 헨리상수가 낮은 물리화학적 특성을 감안하여 매질의 범위를 대기를 제외한 토양, 수체, 저토로 한정하였다. 전체 연구지의 크기를 30m×30m셀로 나타내었을 때, 가로 26개, 세로 47개의 길이로서 총 셀의 개수는 1222개로 구성된다. 그 중 토양 셀이 1194개, 수체, 저토 셀이 28개이다. 임진강과 안월천이 합류되는 부분은 10개 구획으로 나누었으며⁵⁾ 단계별 농도를 파악하였다(<그림 3-1, 그림 3-2 참조>).



<그림 3-1> 토양, 수체, 저토 모델 도표(토양 셀 : 1194개, 수체·저토 셀 : 28개)

5) 10개 구획의 각 셀의 크기는 300m×50m이다.



<그림 3-2> 연구지 계획(흰색 : 토양, 푸른색 : 수체)

2) 물질수지방정식

본 모형에서 시스템 내의 오염물질의 전체 변화속도는 각 셀(cell)에서의 매시간의 오염물질변화속도의 합으로 나타내어진다.

$$V_{sys} \frac{dC_{sys}}{dt} = \frac{dM_{sys}}{dt} = \Sigma \frac{dM_i}{dt}$$

V_{sys} : 시스템 부피(m^3)

C_{sys} : 시스템 내 오염물질 몰농도(mol/m^3)

M_{sys} : 시스템 내 오염물질 몰수(mol)

M_i : 단일 셀 내 오염물질 몰수(mol)

각 셀 내의 오염물질 변화속도는 유입률-유출률 값이다.

$$\frac{dM_i}{dt} = E_i + \sum_j (T_{j,i} - T_{i,j}) + (F_{in} - F_{out}) - R_i$$

E_i : i 셀로의 오염물질의 직접 배출

$T_{j,i}$: j 셀에서 i 셀로의 유입

$T_{i,j}$: i 셀에서 j 셀로의 유출

F_{in}, F_{out} : 인접 지역에서의 하천의 이류를 통한 유입 및 제거(수체)

R_i : 분해에 의한 제거

3) 매체별 반영 기작

(1) 토양

토양에서는 포탄사격 및 폭발로 인한 배출을 반영하였고, 토양 내 분해(degradation)로 제거되는 기작과 지하수로 침출(leaching), 강우에 의하여 수체로 이동하는 강우 유출(Water runoff) 및 지표 유출(Solid runoff)을 반영하였다(<표 3-1> 참조). 강우유출은 Soil Conservation Service (SCS) curve number method를 이용하였다(Hawkins *et al*, 1985). 지표유출은 범용토양손실공식(universal soil loss equation, USLE)(Wischmeier *et al*, 1978)을 이용하였는데 이에 필요한 경사도, 경사길이, 토양특성, 피복도, 강우인자, 토양침식인자, 침식조절인자 등 유역의 입력자료는 GIS프로그램에서 산출하였으며, 유사전달율(Delivery ratio)공식(Roehl, 1962)을 이용하여 실제 토사유실량을 구하였다.

한편, 토양 내 유기오염물은 입자상, 가스상, 용존상 및 용존유기탄소 흡수상으로 존재하는 것을 가정하였다.

(2) 수체·저토

수체에서는 분해와 임진강에 의한 이류(Advection)로 인하여 제거되는 기작, 저토와의 탈착(Desorption), 흡착(Adsorption), 침강(Sedimentation)과 재부유(Resuspension)를 반영하였다(<표 3-2> 참조). 저토 내에서는 분해되어 제거되는 기작, 저토 내로 매장(Burial)되는 양을 반영하였다(<표 3-3> 참조).

<표 3-1> 토양 내 거동기작

출발	목적	기작	수식	설명
토양	.	분해	$k_{soil} \cdot V_{soil} \cdot C_{SM}$	k_{soil} : 토양 내 분해 반응속도 상수, $[1/h]$ V_{soil} : 토양 부피(m^3) C_{SM} : 토양 내 RDX농도, $[mol/m^3]$
	수체	강우유출	$U_{wro} \cdot A_{soil} \cdot (\frac{C_{SM}}{K_{smsw}})$	U_{wro} : 강우 유출 속도, $[m/h]$ A_{soil} : 토양 면적, $[m^2]$ K_{smsw} : 토양매질-토양 내 용존상 간 오염물의 분배 계수
	수체	토사유실	$U_{sro} \cdot A_{soil} \cdot (\frac{C_{SM}}{K_{smsp}})$	U_{sro} : 토사 유출 속도, $[m/h]$ K_{smsp} : 토양매질-토양 내 입자상 간 오염물의 분배 계수
	지하수	침출	$U_{Leach} \cdot A_{soil} \cdot (\frac{C_{SM}}{K_{smsw}})$	U_{Leach} : 침출 속도, $[m/h]$

<표 3-2> 수체 내 거동기작

출발	목적	기작	수식	설명
수체	·	이류	$Q_{in} \cdot C_{(w,in)} - Q_{out} \cdot C_w$	Q_{in}, Q_{out} : 하천 이류부피 속도, $[m^3/h]$ $C_{(w,in)}$: 수체 내 오염물질 농도, $[mol/m^3]$ C_w : 수체 내 전체 오염물질 농도, $[mol/m^3]$
	·	분해	$k_w \cdot V_w \cdot C_w$	k_w : 수체 내 분해 반응속도 상수, $[1/h]$ V_w : 수체 부피, $[m^3]$
	저토	흡착	$k_{ow sed} \cdot A_{w sed} \cdot \frac{1}{(1+K_{ps s})} \cdot C_w$	$k_{ow sed}$: 수체방향 물질 전달 계수, $[m/h]$ $A_{w sed}$: 저토 면적, $[m^2]$ $K_{ps s}$: 수체입자-수체내용존상 간 오염물의 분배 계수
	저토	침강	$U_{ss dep} \cdot A_{w sed} \cdot \frac{K_{ps s}}{(1+K_{ps s})} \cdot C_w$	$U_{ss dep}$: 저토 침강 속도, $[m/h]$

<표 3-3> 저토 내 거동기작

출발	목적	기작	수식	설명
저토	.	분해	$k_{sed} \cdot V_{sed} \cdot C_{SdM}$	k_{sed} : 저토 내 분해 반응속도 상수, $[1/h]$ V_{sed} : 저토 부피(m^3) C_{SdM} : 저토 내 오염물질 농도, $[mol/m^3 \text{ sediment}]$
	수체	흡착	$k_{oused} \cdot A_{used} \cdot \frac{C_{SdM}}{K_{sdmsdw}}$	k_{oused} : 수체방향 물질 전달 계수, $[m/h]$ A_{used} : 저토 면적, $[m^2]$ K_{sdmsdw} : 토양매질-토양내용존상 간 오염물의 분배 계수
	수체	재부유	$U_{resus} \cdot A_{used} \cdot (\frac{C_{SdM}}{K_{sdmsdp}})$	U_{resus} : 저토 재부유 속도, $[m/h]$ K_{sdmsdp} : 저토매질-저토내입자상 간 오염물의 분배 계수
	저토 아래	매장	$U_{burial} \cdot A_{used} \cdot \frac{C_{SdM}}{K_{sdmsdw}}$	U_{burial} : 저토 매장 속도, $[m/h]$

2. 토사유실과 지표유출량 산출

Runoff량은 Solid Runoff(토사유실량)와 Water Runoff(지표유출량)로 구분하여 구할 수 있다.

1) 토사유실량 산출

토양유실량을 측정하기 위한 대표적인 방법은 Wischmeier 등(1978)에 의해 고안된 USLE(Universal soil loss equation)가 있다. USLE는 강우, 토양침식, 지형, 피복관리, 침식조절의 5개 인자로 나타내며, 면상침식과 세류침식⁶⁾에 의한 유역의 토양유실량을 추정하는데 널리 이용되고 있다.

$$A = R \times K \times LS \times C \times P$$

A : 토양유실량 ($ton \cdot ha^{-1} \cdot yr^{-1}$)

R : 강우인자 ($MJ \cdot mm \cdot ha^{-1} \cdot hr^{-1} \cdot yr^{-1}$)

K : 토양침식인자 ($Mg \cdot ha^{-1} \cdot hr \cdot MJ^{-1} \cdot ha \cdot mm^{-1}$)

LS : 지형인자 (dimensionless)

C : 피복관리인자 (dimensionless)

P : 침식조절인자 (dimensionless)

6) 면상침식 : 토양입자가 토양표면에서 일률적이고 균일하게 유실되어 막이 얇게 벗겨지듯 토양이 유실되는 침식.

세류침식 : 20cm 내외의 깊이와 폭의 세류(rill)에서 일어나는 침식.

(1) 강우침식인자(R factor) 산출

강우 침식인자는 연평균 강우침식인자와 단일 호우 침식인자로 구분되어 이용하는데 이번 연구에는 단일 침식인자를 사용할 예정이다. 초기에 내리는 비는 지면에 흡수된다. 강우인자는 이런 흡수되는 강우량을 12.5mm로 보고, 이를 초과하는 강우일 때의 강우 운동에너지를 계산한다. 본 연구에서는 CORDEX East Asia의 3시간별 강우자료를 가지고 있으므로 1시간 해상도를 가정하여 강우량이 12.5mm이상일 때를 선정하였다. 독립강우는 직전의 강우가 6시간을 초과하지 않을 때를 지정하였다. 강우기간은 1957년부터 2016년으로 반영하였다.

- 1) 3시간 간격으로 호우를 여러 구간으로 분할한다.
- 2) 각 구간의 강우량 $r(\text{mm})$ 와 강우강도 $i(\text{mm/hr})$ 를 구한다.
- 3) 각 구간의 운동에너지 $KE(\text{MJ/ha mm})$ 를 계산한다.(Brown & Foster, 1987)

$$KE_j = 0.29[1 - 0.72\exp(-0.082i)]$$

여기서 KE_j 는 구간단위시간의 강우량이 갖는 단위에너지로 MJ/ha mm단위를 가지며 i 는 구간의 강우강도(mm/h)이다.

- 4) 구간의 총 에너지 E_i 계산 : 이는 각 구간의 강우량이 갖는 총 에너지로 4단계의 운동에너지에 구간강우량 $r(\text{mm})$ 를 곱해서 얻는다.

$$E_j = KE_j \times r, \left(\frac{\text{MJ}}{\text{ha}} \right)$$

5) 호우의 총 에너지 E 계산 : 독립 호우사상이 갖는 총 에너지로 모든 구간에너지의 합으로 주어진다.

$$E = \sum E_i, \left(\frac{MJ}{ha} \right)$$

6) 강우인자 R 계산 : 먼저 호우의 30분 최대강우량과 강우강도 I_{30} 를 구하고 호우의 총 운동에너지 $E = \sum E_i$ 에 $I_{30}(mm/h)$ 를 곱하여 강우인자 R을 얻는다. 본 연구에서는 30분 단위의 최대강우량을 구할 수 없으므로 1시간 단위의 최대강우량을 산정하여 구하였다(K. G. Renard *et al*, 1997). 60년간 강우량이 가장 많았던 해인 1981년의 강우인자를 예를 들면 강우사상 횟수는 31회이며 연 강우인자는 3488.1로 나타났다(<표 3-4> 참조).

<표 3-4> 1년간 독립 강우사상의 강우인자 값(1981년 기준)

강우사상 횟수	최대값	최소값	평균	강우인자 (MJ mm/ha h yr)
31회	697.7	0.9	112.5	3488.1

(2) 토양침식인자(K factor) 산출

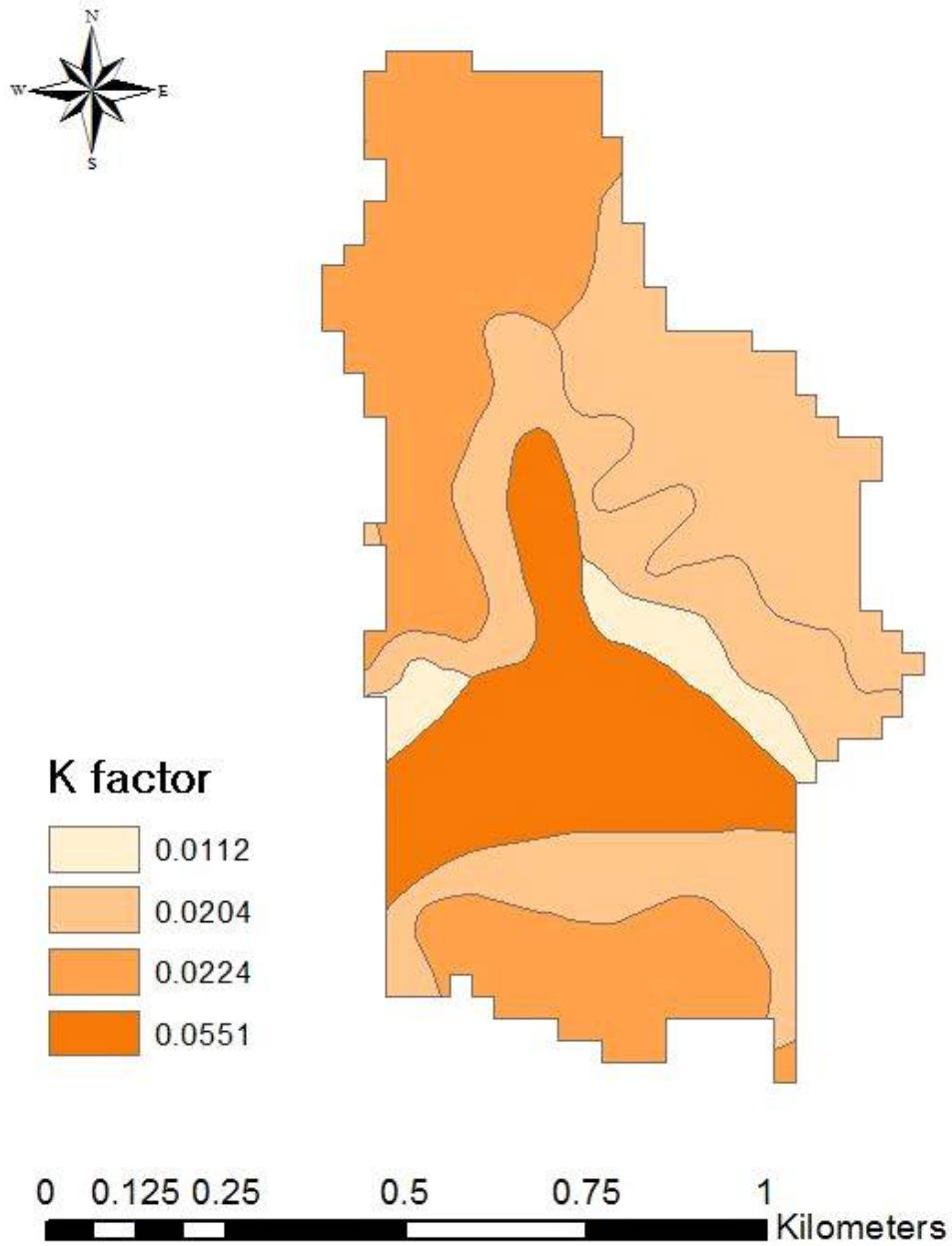
토양침식인자(K)는 토양의 침식에 대한 토양 표면의 저항척도로서 모래, 실트, 극세사, 유기물의 백분율과 토양의 조직과 투수성의 함수로 나타낸다.

토양침식인자는 국립농업과학원(<http://www.ast.go.kr>)에서 제작한 연천 정밀토양도를 이용하였다. 정밀토양도에는 K값에 대한 정보가 포함되어 있다. 토양침식인자는 조사대상지역의 토양통에 따라 환경부의 ‘표토의 침식 현황 조사에 관한 고시’에 제시된 표를 참조하여 산출하여 입력자료로 이용하였다. 연구지역의 경우 총 5개의 토양명으로 분류되었다(<표 3-5> 참조).

연구지역의 K값의 평균값은 0.0216이었다(<그림 3-3> 참조).

<표 3-5> 정밀토양도의 토양구분과 토양침식 인자(K) 값

토양 부호	토양 통명	배수 등급	토양침식인자(K)
SNE2	송산	A	0.0224
JoC	지곡	A	0.0112
OnD2	오산	B	0.0204
OnE2	오산	B	0.0204
SfB	송당	B	0.0551



<그림 3-3> 토양침식인자(K)값 산출

(3) 피복관리인자(C factor) 산출

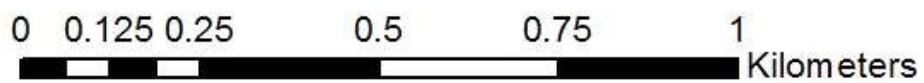
C인자는 작물, 성장단계, 작부체계(작물의 종류별 재배순서), 경작체계, 곡물수확, 잔류물 및 관리방안에 좌우된다. 본 연구에서는 환경부에서 제시한 ‘표토의 침식 현황 조사에 관한 고시’에 명시된 토지 이용 및 식생 피복에 따른 식생피복인자 값(C)을 사용한다(환경부, 2012).

토지피복지도는 환경공간정보서비스에서 철원 메타데이터 대분류(2000년대 말) 자료를 참고하였다.

C값은 교란되지 않는 삼림지역의 최소 0.00001에서 식생이 없는 교란지역의 최대 1.0에 이른다(윤태훈, 2011). 피탄지는 식생이 없으며, 토지피복지도에서 피탄지를 포함한 주변지역이 나지로 식별되어 C값은 나지에 해당되는 1로 하였다(<그림 3-4> 참조).



피복분류



<그림 3-4> 피탄지 내 피복분류

(4) 지형인자(LS factor) 산출

지형인자 LS는 ArcMAP을 이용하여 L과 S에 대한 공식에 지형정보를 입력하여 산출하였다(Wischmeier, 1978).

L에 대한 식은 다음과 같다.

$$L = \left(\frac{\lambda}{22.1} \right) m$$

L : 사면의 길이(m)

λ : 사면의 길이의 수평거리(m)

m : 사면의 경사에 따라 주어지는 지수(<표 3-6> 참조).

S에 대한 식은 다음과 같다.

$$S = 65.41 \sin^2 \theta + 4.56 \sin \theta + 0.065$$

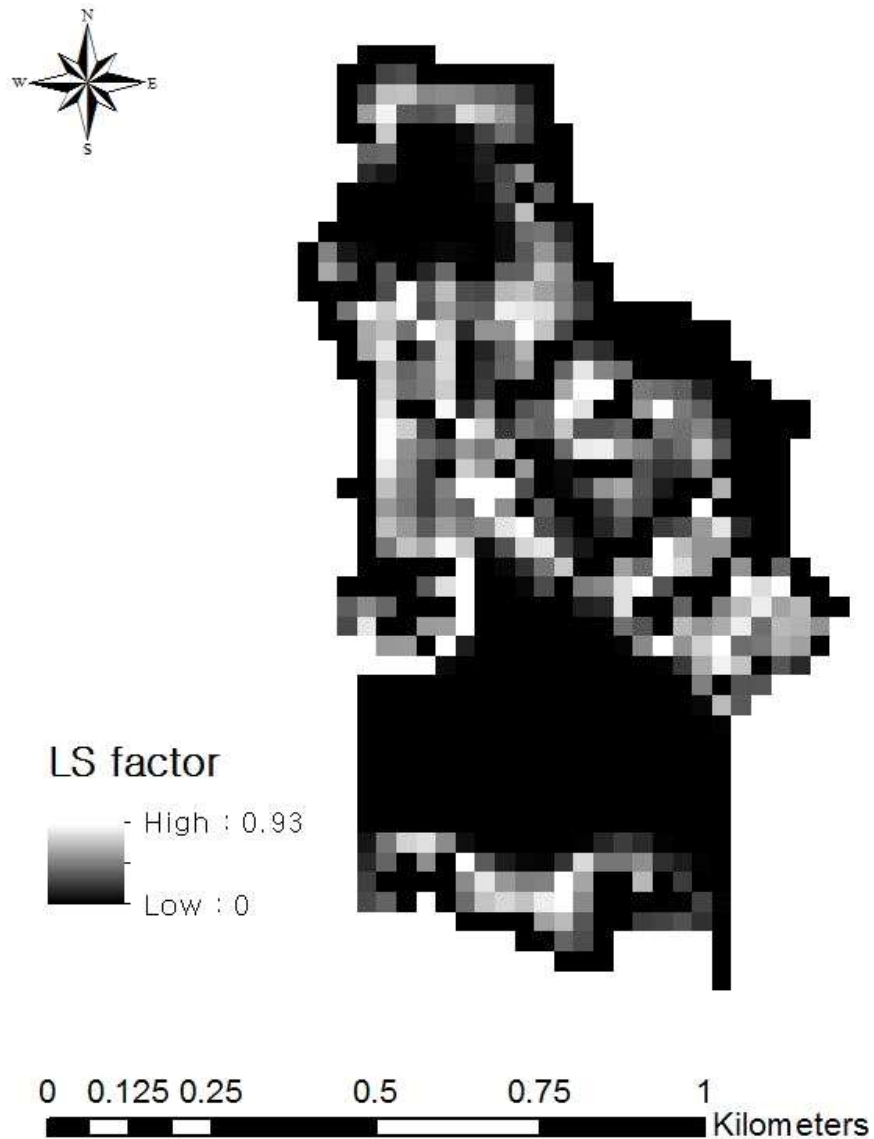
θ : 경사각(°)

DEM자료를 유역에 맞게 자른 후, 자료에 포함되어 있는 Flow Accumulation(흐름축적), 경사도 값을 이미지로 추출하고, ArcMAP의 accumulation과 경사도 θ 값에서 각각 길이와 경사도를 구하는 공식을 raster calculator기능을 이용하여 LS값은 0.07로 산출하였다(<그림 3-5> 참조).

<표 3-6> 사면의 경사에 따른 지수 m

사면경사	S<1%	S=1~3%	S=3.5~4.5%	S>5
m	0.2	0.3	0.4	0.5

출처 : 윤태훈, 2011



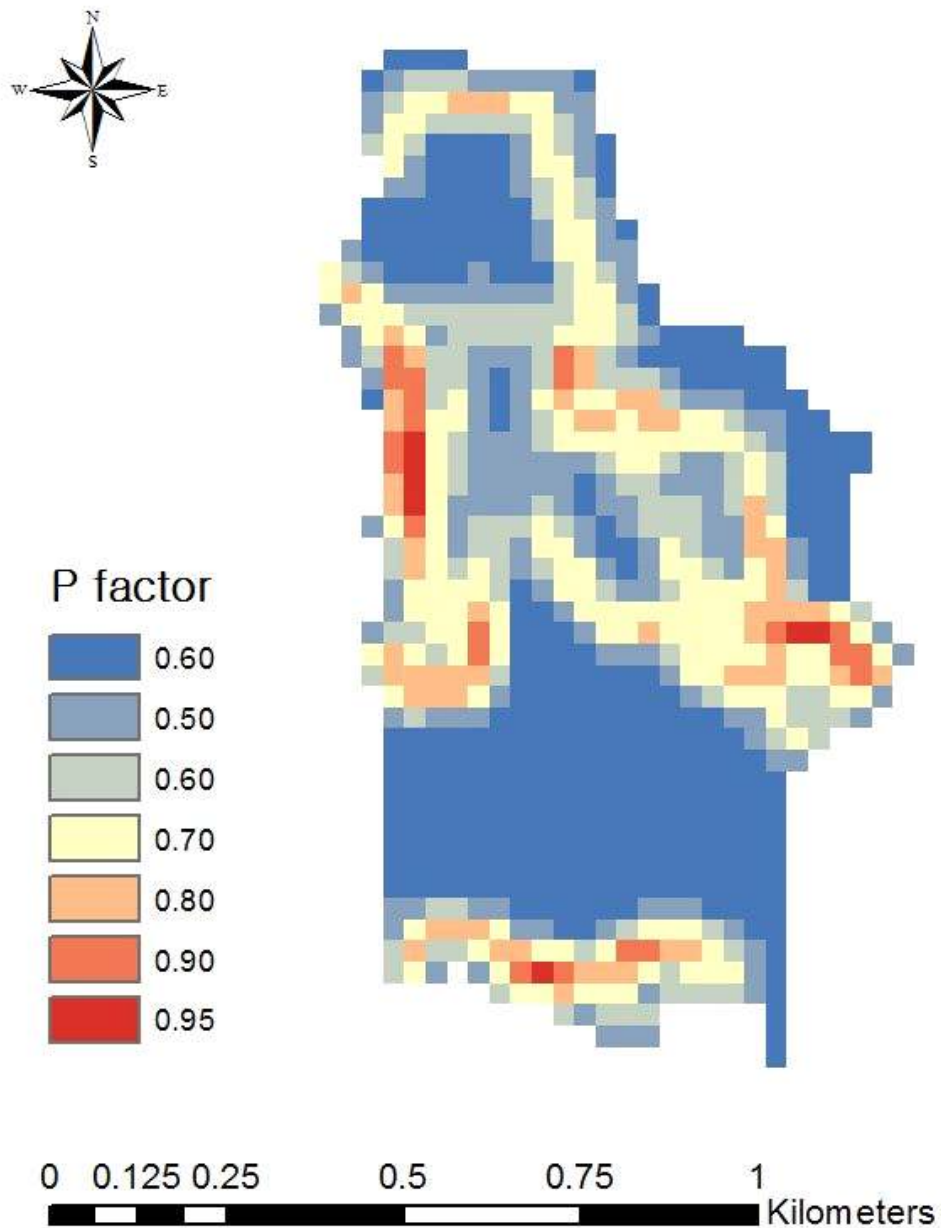
<그림 3-5> 지형인자(LS)값

(5) 침식조절인자(P factor) 산출

침식조절인자를 추출하기 위해서는 환경부에서 제안한 표(환경부, 2012)를 이용하여 P값을 산출하였다(<표 3-7> 참조). 토지 이용 및 보전 관리 방법에 따른 침식조절인자 값(P)을 기준으로 피탄지는 나지이므로 표에서 보전관리방법 중 경사도의 8개 기준에 따라 침식조절인자 값을 적용시킨 P값의 평균은 0.6이다(<그림 3-6> 참조).

<표 3-7> 토지 이용 및 보전 관리 방법에 따른 침식조절인자 값(P)

토지 이용	보전 관리 방법	침식조절인자 값(P)
논	경사도 < 2%	0.12
	경사도 2 ~ 7%	0.10
	경사도 7 ~ 15%	0.12
	경사도 15 ~ 30%	0.16
	경사도 > 30%	0.18
밭	상하경 재배	1.00
	등고선 재배	0.54
	등고선 비닐멀칭	0.39
	등고선 휴고재배	0.25
	등고선, 비닐멀칭	0.19
초지	등고선재배	0.54
나지, 산림, 과수원 및 건설용지	경사도 1 ~ 2%	0.60
	경사도 2 ~ 5%	0.50
	경사도 5 ~ 8%	0.50
	경사도 8 ~ 12%	0.60
	경사도 12 ~ 17%	0.70
	경사도 17 ~ 20%	0.80
	경사도 20 ~ 25%	0.90
	경사도 > 25%	0.95



<그림 3-6> 침식조절인자(P)값

(6) 토양유실량 산정

연평균 토양침식량을 분석하기 위해 산출된 USLE 각 인자인 R, K, LS, C, P의 각 값을 곱한다. 본래 각 셀별로 측정된 인자 값들을 모두 각각 계산하여 반영해야 하나 해당 연구지는 0.75km²에 달하는 소유역이므로 강우사상에 따라 달라지는 R인자와 C인자를 제외하고 평균값을 사용하였다(<표 3-8> 참조).

<표 3-8> 토양유실량 각 인자별 값

인자	R	K	LS	C	P
범위	0.9~697.7	0.021	0.970	1.000	0.600

(7) 유사전달율

오염부하량을 평가하기 위해서 USLE모델을 기본으로 하지만, 하천 하류지역에 도달하는 물질의 총량을 직접적으로 계산하기 위해서는 유사전달율(Sediment Delivery Ratio, SDR)을 고려해야 한다. 일부 침전물이 유역 외부지역이나 하류 일부 지점에 저장될 수 있기 때문이다. 유사전달율은 주어진 유역의 최하단에 위치하는 방수구에 도달하는 유사량을 구하는데 이용된다. 유사전달율을 구하는 경험식은 대단히 많이 있으나(Walling, 1983) 이 연구에서는 아래의 식을 이용하였다(Roehl, 1962). 셀면적 $9.0 \times 10^{-4} km^2$, 경사도 0.848, 분기인자 1을 대입하여 산출된 DR은 5.16이다.

$$\log DR = 4.5 - 0.23 \log W + 0.51 \log \frac{R}{L} - 2.786 \log BR$$

DR = 유사전달율(The Delivery ratio) (%)

W = 유역면적(The watershed area) (km²)

R/L = 유역경사도(The slop of the watershed)

BR = 분기인자(The Bifurcation ratio)

2) 지표유출량 산출

(1) 지표유출량, Q

지표유출량을 구하기 위한 식은 다음과 같다(Cronshey, 1986).

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a) + S}$$

Q = 지표유출량(mm)

P = 누적강우량(mm)

S = 강우유출 시작 후, 토양의 강우최대흡수량(mm)

I_a = 초기손실량(mm)

강우 최대 흡수량, S (mm)와 초기손실량 I_a (mm)은

$$S = \left(\frac{1000}{CN} \right) - 10$$

$$I_a = 0.05S$$

CN = 유출곡선번호

따라서 다음 식을 이용해 지표유출량을 산정할 수 있다.

(2) Runoff Curve Number(Mark & Marek, 2009)

유출곡선번호(Curve Number)는 수문학적 토양군(hydrologic soil group), 선행함수조건(antecedent moisture conditions, AMC)을 고려한다(윤태훈, 2011). 1년을 비가 많이 오는 정도로 성수기(growing season)과 비성수기(dormant season)으로 구분하고 5일 선행강수량을 기준으로 선행함수조건을 결정한다(<표 3-9> 참조). 2009년 국립농업과학원의 정밀토양도에서 제시된 수문학적 토양군과 피복조건을 가지고 산출할 수 있다. 성수기는 5-9월로 하여 그 외의 달은 비성수기로 구분하였다(윤태훈, 2011). 안월천의 정밀토양도에서 수문학적 토양군은 모두 B이며, 피탄지의 CN값은 나지토양이므로 86으로 반영하였다(<표 3-10> 참조).

<표 3-9> 선행 토양함수조건

AMC	선행토양수분상태	5일 선행강수량 P_5 (mm)	
		성수기	비성수기
I	토양이 건조상태로 유출률이 낮은 상태	$P_5 < 35.56$	$P_5 < 12.70$
II	토양의 수분과 유출률이 보통인 상태	$35.56 < P_5 < 53.34$	$12.70 < P_5 < 27.94$
III	선행강우로 인하여 토양이 포화상태로 유출률이 높은 상태	$P_5 > 53.34$	$P_5 > 27.94$

<표 3-10> 도시지역의 유출곡선번호

	피복상태		수문학적 조건	수문학적 토양군별 유출곡선번호			
	토지이용 상태	처리상태		A	B	C	D
농 경 지	휴경지	나지토양		77	86	91	94
	줄경작	경사경작	poor good	72 67	81 78	88 85	91 89
		등고선경작	poor good	70 65	79 75	84 82	88 86
		등고선, 테라스경작	poor good	66 62	74 71	80 78	82 81
	소립곡물 (밀, 보리 등)	경사경작	poor good	65 63	76 75	84 83	88 87
		등고선경작	poor good	63 61	74 73	82 81	85 84
		등고선, 테라스경작	poor good	61 59	72 70	79 78	82 81
	조밀과중 콩과작물	경사경작	poor good	66 58	77 72	85 81	89 85
		등고선경작	poor good	64 55	75 69	83 78	85 83
		등고선, 테라스경작	poor good	63 51	73 67	80 76	83 80
비 농 경 지	목초지, 초지	등고선경작	poor fair good	47 25 6	67 59 35	81 75 70	88 83 79
	채초지	등고선경작	good	30	58	71	78
	관목	-	poor good	48 20	67 48	77 65	83 73
	임야	-	poor fair good	45 36 25	66 60 55	77 73 70	83 79 77
	농가	-	-	59	74	82	86

3. 입력자료의 구축

1) 구축자료의 목록

지리정보체계(Geographic Information System, GIS)와의 원활한 활용을 위해 수치표고자료, 정밀토양도, 토지피복도의 3종류의 지도를 활용하였으며(<표 3-11> 참조), 각 수치지도의 공간적 범위는 <표 3-12> 와 같이 통일함으로써 정보의 원활한 교환이 가능하도록 하였다. 수치표고자료의 경우, 유역의 토사유출량 산정시 20m×20m인 경우 실제와 유사한 값을 구할 수 있으며, 해상도가 유사하며 구하기 용이한 30m×30m 해상도 자료를 사용하였다(정인주 외 2002).

<표 3-11> 활용된 디지털 지도

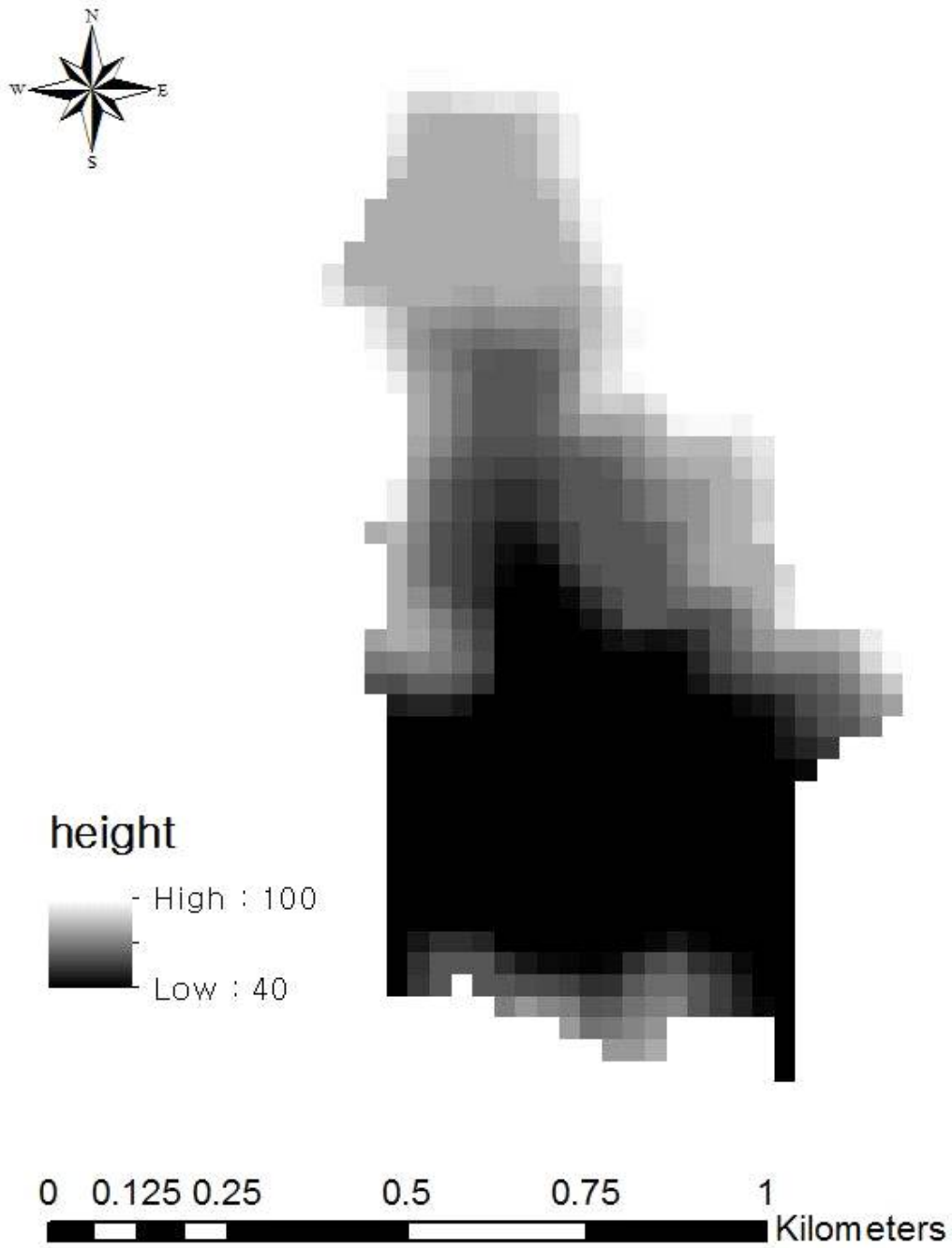
종류	내용	출처
지형	30m×30m 1“디지털 elevation model	수치표고자료(1:50,000)
토양	90m×90m 벡터 형식	정밀토양도(1:25,000)
토지피복	30m×30m 벡터 형식	토지피복도(1:50,000)

<표 3-12> 모델링을 위한 연구지의 지역적 범위

경계	위도	경도	TM y	TM x
좌상	38.12136	127.0029	613469	200269
좌하	38.10512	127.0030	611669	200269
우상	38.12126	127.0165	613469	201439
우하	38.10515	127.0162	611669	201439

(1) DEM보정

물은 상류에서 하류로 흐르지만 실제로 상류가 반드시 높은 것은 아니다. 계곡에 저수지 또는 웅덩이가 있는 경우 하천의 흐름에 의해 그 공간이 가득차면 물이 넘쳐서 다시 하천을 따라 하류로 흐르게 되지만, 지표면상에서 물의 흐름을 정의할 경우 이를 고려할 수 없으므로 주변 셀보다 낮은 지형(Sink)의 경우 오류의 원인이 된다(김혁, 2001). 따라서 ArcMAP의 Fill Sink명령어를 사용하여 Sink를 보정한다. <그림 3-7>은 sink가 보정된 피탄지 지역의 DEM을 나타낸다.

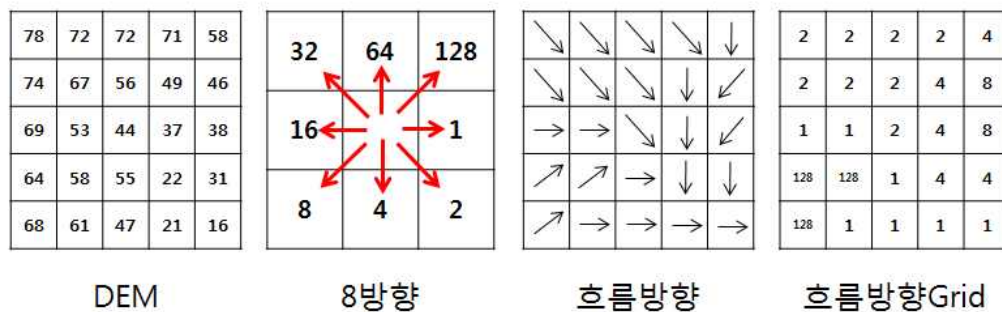


<그림 3-7> Sink가 보정된 피탄지 유역 DEM

(2) 흐름방향(Flowdirection) Grid 생성

지표면에 대하여 수문학적 특성을 반영하는 요소 중 가장 중요한 것은 DEM에서 모든 셀의 흐름의 방향을 결정하는 것인데 ArcMAP의 Flow Direction의 흐름방향 정의 기능을 활용하여 분석하였다.

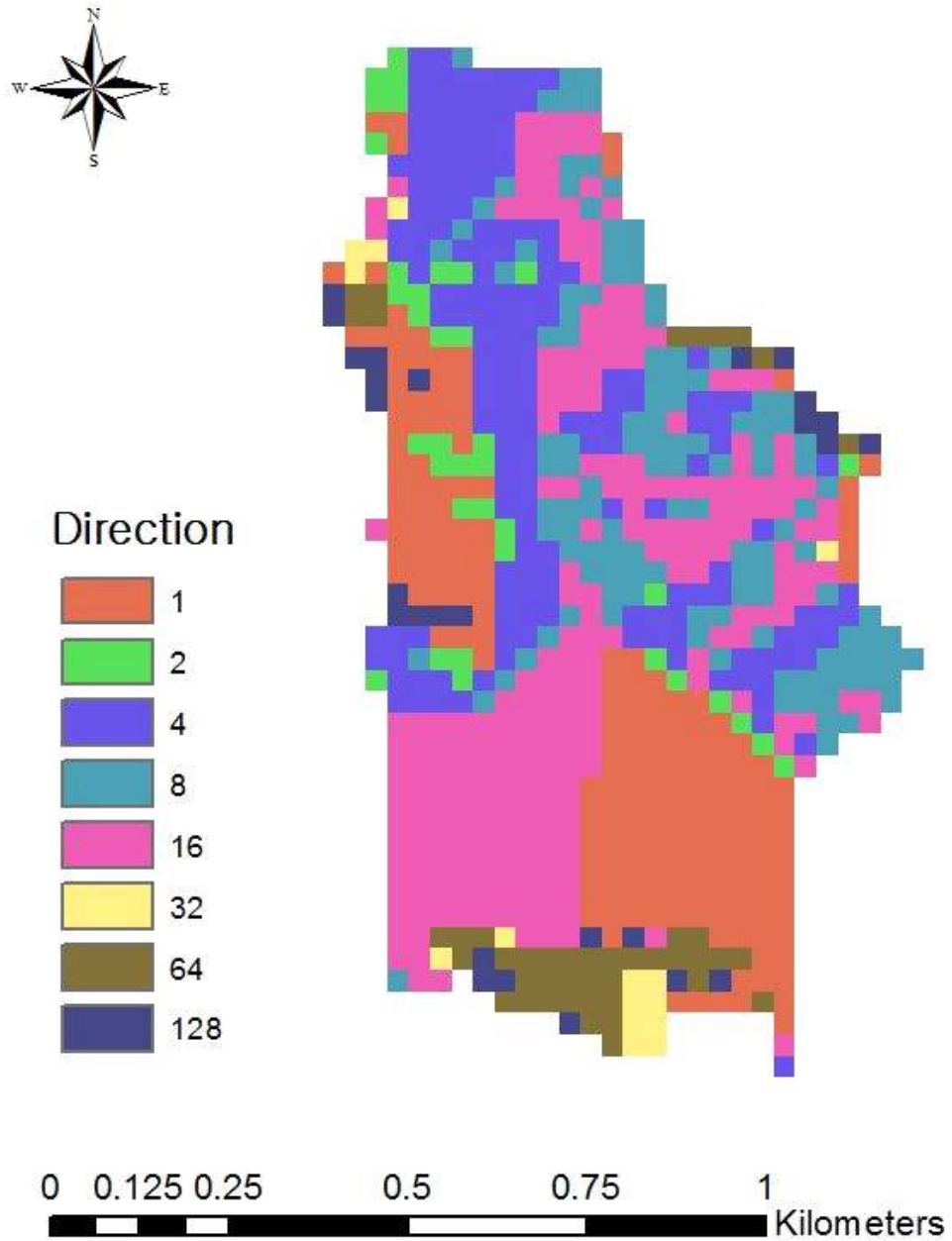
셀의 방향은 8개이고, 하나의 셀의 인접 8개 셀의 고도 값을 비교 후 흐름의 방향을 정한다. 즉, 각 셀들의 흐름방향은 8방향중의 1방향으로 흘러가게 되는데 중심 셀을 기준으로 8가지 방향을 나타내는 값을 가지게 된다(김혁, 2001)(<그림 3-8> 참조).



출처 : 김혁, 2001

<그림 3-8> 흐름방향 정의 실행

이 과정을 반복적으로 수행하여 흐름방향 래스터 모형을 생성하게 되는데 Sink가 보정된 경우 모든 셀들이 흐름방향을 정확하게 나타내게 되는데 <그림 3-9>은 피탄지의 흐름방향 Grid를 나타낸다. 본 연구에는 흐름방향 Grid를 모형에 연결하였다.



<그림 3-9> 피탄지 유역 내 지표수 유출 방향
(1:동쪽, 2:동남쪽, 4:남쪽, 8:남서쪽, 16:서쪽, 32:북서쪽, 64:북쪽, 128:북동쪽)

2) 초기조건

본 연구에서는 시공간적 오염농도 변화를 확인하기 위해 다음과 같은 조건을 사용하였다.

RDX 배출이 있기 전 토양, 수체, 저토 농도는 모두 0mol/m^3 으로 가정하였으며⁷⁾, 오직 포탄낙하에 이은 폭파에 의해서만 토양에 화약물질이 배출된다고 가정하였다. RDX는 강우 시에만 수체와 저토로 이동한다. 강우유출과 토사유실은 <그림 3-9>에 나타난 방향에 따라 상류에서 하류로 이동한다.

기상조건과 농도변화 시간의 해상도는 1시간이다. 따라서 1시간 간격으로 셀별, 시간별 농도를 확인할 수 있으며, 토양, 수체, 저토의 오염농도, 토사유실량, 지표유출량을 월평균, 년 평균을 확인할 수 있도록 모형을 구성하였다.

오염물질은 토양 중 표토에 집중적으로 오염이 되며, 해당 연구지는 피탄지로 문헌조사결과 모래지역에서 155mm포를 쏘았을 때 30cm깊이의 구덩이가 생긴다는 연구(Childress, 1970)가 있어 토양 오염 깊이를 0.3m로 반영하였다.

안월천의 유량은 해당시간 지표유출량에 비례하도록 입력하였으며, 수심은 임진강 하천정비계획(2003년)자료에서 측정된 해당구간의 0.4m를 활용하였다. 임진강의 유량은 국가수자원관리종합정보시스템(WAMIS, www.wamis.go.kr)의 연천군(필승교) 관측소의 일 유량 자료를 활용하였으며(2010년 기준), 저수위인 23m을 수심으로 반영하였다. 저토의 깊이는 0.03m로 하였다(Schoorl M *et al*, 2015). 이류는 안월천 상류에서 하류로 진행된다고 가정하였다.

7) 본 연구의 시간은 사격장이 만들어진 1957년부터 2016년까지 60년간이다. 한국전쟁은 1953년 7월 27일 정전협정에 의하여 종결되었으며, 본 연구의 시작연도는 1956년이다. 모의 실험 결과 화약물질은 전쟁종결 후 연구시작 전의 3년간 제거기작(분해, 강우유출, 토사유실)에 의하여 모두 제거되었다. 60년간 년 포탄사격량은 일정하게 유지하였다. 그 이유는 배출량의 정보가 없기도 하지만 지속적으로 일정한 배출량을 주었을 때 각 매체별 농도의 변화양상을 파악하기 위함이었다.

3) 배출량 추정

기존의 연구에서 60mm 박격포탄 폭발 시 포함된 RDX 215g의 0.083%인 180mg이 잔류하였다고 보고되었으며(Walsh *et al*, 2008). 다른 연구에서는 Composition B 2,990g의 120mm 박격포탄과 화약물질 358g의 60mm 박격포탄이 폭발되어 각각 19mg과 50ug이 잔류되었다고 보고되었다(Walsh *et al*, 2005). 본 연구에서 다루고자 하는 155mm 고폭탄의 1발 내에는 7kg의 composition B가 포함되어 있다. 이중 RDX는 60%를 차지하며, 그리고 1일 200발 사격한다고 가정하여⁸⁾ 하루 총 697.2g이 피탄지에 배출된다고 추정하였으며 1시간으로 환산하면 77g이 된다. 사격은 낮에 주로 이루어지기 때문에 오전 10시부터 오후 6시까지(하루 9시간) 실시되며, 강우가 있는 시간에는 사격을 하지 않는 것으로 가정하였다. 그리고 매년 사격훈련이 동일하게 진행된다고 가정하였다. 60년 중 오전 10시부터 오후 6시까지 강우가 내리는 날을 제외한 시간이 가장 적은 년도가 1981년이며, 1981년의 시간이 1641시간이다. 그리고 해당 지역의 포병부대가 40개라고 가정하고 각 부대가 10번 사격을 한다고 하였을 때 1번 당 4시간 한다고 하면 1년의 총 사격시간은 1600시간이 된다. 피탄지 면적은 약 76,000m²이지만 전 면적이 피탄지로 사용되지는 않으며, 포탄은 안월천을 지나 피탄지의 EL.45m 부근에 낙하한다. 사격장의 북서-남동방향으로 길게 연이어 있는 탄착점은 산의 3부 능선 끝단에 위치하고 있다.

화약물질은 포탄이 떨어지는 지점에 골고루 분산되어 30m×30m 40개의 셀에 1.94g(0.0087mol)이 60년간 1시간 단위로 배출된다고 가정하였다(<표 3-13>, <그림 3-10> 참조).

8) 1개 포병대대는 18문의 포로 이루어져 있으며, 수정사격(1문 사격)과 일제사격(18문 사격) 순으로 진행하면 대략 총 100발을 사격한다. 이 사격은 반나절동안 진행되며, 오전, 오후에 각각 다른 훈련이 진행된다고 가정하였을 때 하루에 200발이 사격된다.

Emission = S.N. × RDX × R.P.

(697.2 = 200 × 4200 × 0.00083)

Emission : 배출량(g/m³/day)

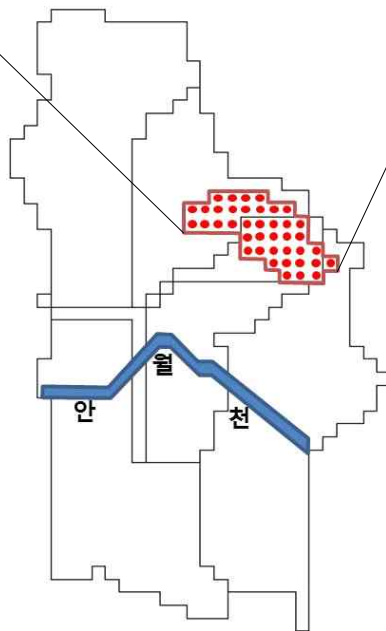
S.N.(Shooting Number) : 사격발수(발/day)

RDX(RDX in shell) : 1발당 RDX함량(g/발)

R.P.(Residual Probability) : 폭발 시 화약물질 잔류율(%/100)

<표 3-13> RDX 배출 토양 셀 번호

		378	379	380	381				
402	403	404	405	406	407	408	409		
428	429	430	431	432	433	434	435	436	
				458	459	460	461	462	
				484	485	486	487	488	489
						512	513	514	515
							539	540	541
									516



0 0.125 0.25 0.5 0.75 1 Kilometers

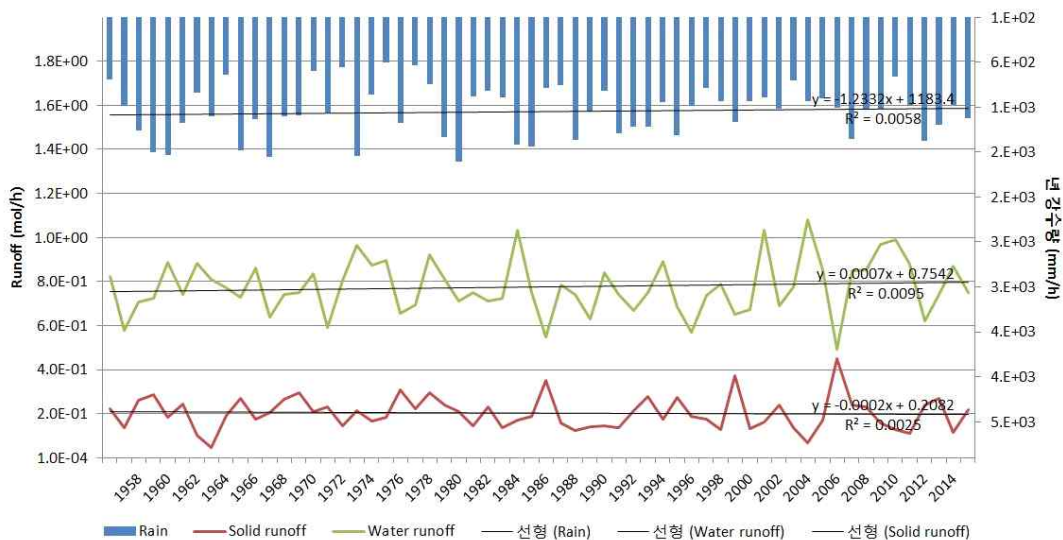
<그림 3-10> 피탄지 내 RDX배출 위치

IV. 결과 및 고찰

1. 기상 분석

기상청 국가기후데이터 센터에서는 1961년 1월 1일 이후 자료가 조회 가능 하였으며, 그마저도 정확한지 확인이 어려웠다. 그 대안으로 지역 기후 모델(Regional Climate Model : RCM)을 비교하기 위한 프로젝트를 진행하고 있는 CORDEX EAST ASIA에서 기상자료를 제공하였으며, 공간해상도는 0.44°(약 50km)이다. 연구를 위하여 경기도 연천지역이 포함된 구역의 1957년부터 2016년까지의 자료를 활용하였다.

60년간(1957~2016년)의 년 강우량의 평균은 1145mm/year이며 최대값은 1704mm/year, 최소값은 602mm/year이다. 년 강우량, 지표유출량, 토사유실량을 그래프로 나타낸 후 추세선을 그린 결과 모두 기울기와 R-제곱값이 0에 가까워 증가 또는 감소 추세를 보인다고 말하기는 어렵다(<그림 4-1> 참조).



<그림 4-1> 60년간 강우량, 토사유실량, 지표유출량 변화

2. 모형 예측의 신뢰도

해당 사격장 피탄지는 배출량의 자료가 없으며, 주기적으로 오염도도 측정하지 않아 예측치와 측정치를 비교하는 데 한계가 있었다. 따라서 군남홍수조절지 환경영향평가서에 포함된 RDX 토양 오염 측정치를 예측치와 비교했다. 측정은 2005년에서 2008년까지 9회에 걸쳐 실시되었으며, 예측치는 측정치의 시기와 동일한 2005~2008년도 해당 월을 선정하였다(<표 4-1> 참조).

1차에서 9차까지 예측치와 실측치의 기하평균값을 비교하였을 때 최고 23.1배에서 최저 0.8배의 차이가 났다(<그림 4-2> 참조). 예측치가 현실을 제대로 반영하는지를 확인하기 위하여 통계적 검증을 실시하였다. 모수 검정방법을 사용하기 위해서는 수집된 자료가 정규분포를 이루고 있다는 가설을 만족해야 한다. 하지만 1차 측정치(30개)와 예측치 제외하고는 모두 측정치의 표본의 크기가 30개보다 작기 때문에 중심극한정리⁹⁾에 의하여 정규분포를 따른다고 볼 수 없었다. 1차 측정치와 예측치는 또한 SPSS분석에 따르면 정규분포라고 볼 수 없었다. 그리고 예측치는 14~46개가 있는 반면, 측정치는 2~30개로 다양하여 대응이 되지 않았다. 그래서 비모수 검정방법 중 두 모집단이 정규분포를 이루고 있지 않으면서 독립표본일 때 이용하는 맨-휘트니(Mann Whitney) 검정 방법을 적용하였다. SPSS 프로그램에서 맨-휘트니 검정을 적용하기 위하여 분석-비모수검정-(2-독립표본) 기능을 사용하였다. 그리고 두 집단 간 차이는 각 년도의 월별 측정치와 예측치를 각각 비교하였다.

맨-휘트니 검정결과 1, 2, 3, 4, 5, 6차 측정치(이하 “유의 측정치”라 한다)와 예측치의 통계적으로 유의한 차이가 없는 것으로 나타났으며, 7,

9) 모집단의 평균이 μ 이고 분산이 σ^2 일 때, 임의추출된 크기가 n 인 표본으로부터 계산된 표본평균 \bar{X} 는 n 의 크기가 큰 경우(보통 30이상) 근사적으로 정규분포를 따르게 되며 그 평균은 μ 이고 표준편차는 σ/\sqrt{n} 가 된다(구자홍, 2000).

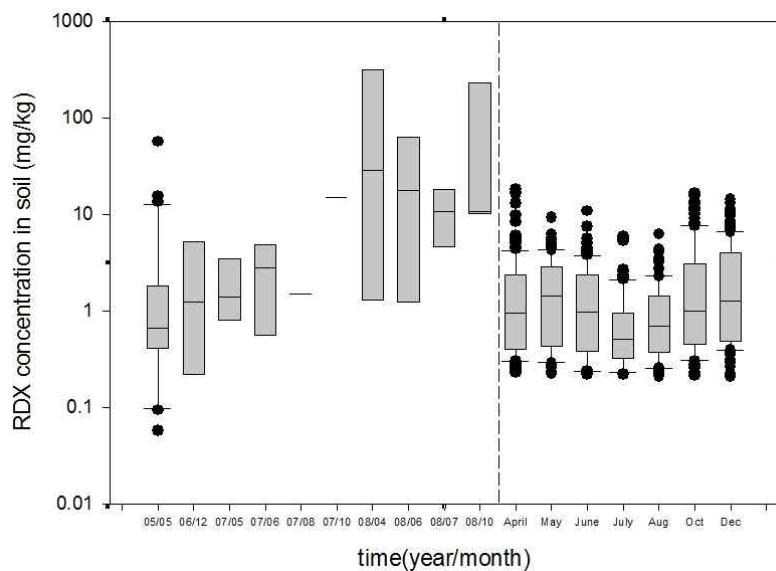
8, 9, 10차 측정치(이하 “비유의 측정치”라 한다)와 예측치는 차이가 있는 것으로 나타났다(<표 4-1> 참조).

같은 사격장 내에서 년도 별 측정한 오염농도의 범위가 차이를 보이는 이유는 다음과 같이 예상된다. 본 연구에서는 30m×30m 토양에 균등하게 오염물질이 배출되는 것으로 가정하였으나, 실측치는 불균등하게 분포하였다. 첫째, 화약물질이 연소 시 토양에 고르게 분사되지 않고 뭉친 상태로 배출이 되어 측정을 하였을 때 주변 농도보다 상당히 높은 농도를 보일 수 있다. 둘째, 사격장 내 강우의 영향에 따라 오염농도의 영향이 클 것으로 예상된다. 예를 들어 강우가 내릴 때는 오염농도가 급속히 낮아졌다가 강우가 내리지 않을 때는 사격에 의하여 농도가 축적되어 높아졌다가 하는 현상이 반복되어 측정하는 날짜에 따라서 오염농도가 측정이 되지 않을 때도 있고, 어떤 때는 높은 농도로 측정이 될 것이다.

<표 4-1> 사격장 피탄지 토양 RDX농도 측정치와 예측치의 검증결과

차수	측정치			예측치		유의 확률
	년월일	결과 (mg/kg)	측정지점 /조사지점	월	결과 (mg/kg)	
1	'05.05.07	0.50~57.09	30/38	05	0.22~9.26	0.114
2	'06.12.10	0.22~5.24	3/10	12	0.21~14.33	0.739
3	'07.05.13	0.5~3.8	5/10	05	0.22~9.26	0.581
4	'07.06.30	0.56~4.86	3/10	06	0.22~10.89	0.203
5	'07.08.11	0.81~2.19	2/10	08	0.21~6.27	0.336
6	'07.10.20	7.48~22.84	2/10	10	0.21~16.80	0.053
7	'08.04.06	1.3~978.76	6/10	04	0.23~18.20	0.007
8	'08.06.29	1.25~63.32	3/10	06	0.22~10.89	0.029
9	'08.07.27	4.52~20.42	5/10	07	0.22~5.97	0.000
10	'08.10.12	10.25~232.2	3/10	10	0.21~16.80	0.006

측정치 출처 : 한국수자원공사, 2005



<그림 4-2> 측정치(눈금선 왼쪽)와 예측치(눈금선 오른쪽)의 비교

측정치간 큰 차이가 남에 따라 통계적으로 유의한 차이가 있는지를 파악해보았다. 그 결과 2005년, 2006년, 2007년과 차이가 나는 2008년과의 유의수준은 각각 0.000, 0.039, 0.007로 모두 유의한 차이가 있는 것으로 나타났다. 모형은 2008년의 실측치를 제외한 나머지 2005, 2006, 2007년의 오염도를 예측할 수 있다고 할 수 있으며, 유의적인 차이가 있는 2008년을 제외한 계절별, 년별 예측치와 실측치 역시 유의한 차이는 없는 것으로 나타났다(<표 4-2> 참조).

<표 4-2> 측정치와 예측치의 계절별, 년별 유의수준

계절별	유의수준	년별	유의수준
봄(3월~5월)	0.211	2005	0.154
여름(6월~8월)	0.112	2006	0.316
가을(9월~11월)	0.053		
겨울(12월~2월)	0.739	2007	0.052

3. 매체별 오염도의 시·공간적 변화 예측 및 분석

1년간의 강우사상에 의한 각 매체별 1시간 간격의 농도변화를 분석하였다. 대상년도는 연구기간인 60년의 평균강우량(1145mm)과 유사한 강우량을 보이는 1990년(강우량 1149mm)를 대상으로 하였다.

배출조건의 유무와 주변 셀에 의한 강우유출 영향의 유무에 따라 토양농도의 변화가 달라질 것으로 예상되어 토양 셀을 구분하여 결과를 분석하였다.

배출이 일어나는 지점 중 주변 셀의 강우유출에 의해 오염도가 영향을 받지 않는 지점중 하나인 378번 셀의 1년 동안의 토양농도를 확인하였다. 강우가 없는 기간 동안 지속적인 배출에 의하여 토양농도는 일정한 속도로 증가하나 강우가 발생하는 시점에서는 급격히 하락하는 모습을 보인다. 그리고 강우가 지속되는 기간에는 오염도는 증가하지 않는 모습을 보인다(<그림 4-3> 참조).¹⁰⁾ 이는 RDX가 강우유출과 토사유실로 인하여 인접 셀이나 수체로 이동하기 때문이다.

배출이 일어나지만 주변 셀로부터의 강우유출에 따라 오염도가 영향을 받는 지점중 하나인 403번 셀에서의 1년 동안의 토양농도는 378번 셀의 농도보다 높은 수준에서 유지되며(<표 4-3> 참조), 강우사상이 발생할 때 역시 오염농도는 낮아진다(<그림 4-3> 참조). 이는 배출량이 있는 다른 지점의 셀로부터 강우유출, 토사유실로 인하여 오염물질이 동시에 해당 셀로 유입되었다가 유출이 진행되기 때문이다.

배출이 일어나지 않는 지점인 455번 셀에서의 1년 동안의 토양농도는 378번 셀, 403번 셀과 달리 배출량이 없기 때문에 축적되는 모습은 없으며, 강우사상이 발생할 때 농도가 급격하게 올라갔다가 떨어지는 모습을 보인다(<그림 4-3> 참조). 최대값은 378번과 403번 셀보다 높으나, 배출량이 없기 때문에 평균값은 가장 낮다(<표 4-3> 참조).

수체 셀(711번)에서는 강우사상으로 인하여 토양으로부터 하천에 화약물질이 유입이 되며 수체 내 분해와 저토로의 이동에 의해서 낮은 속도

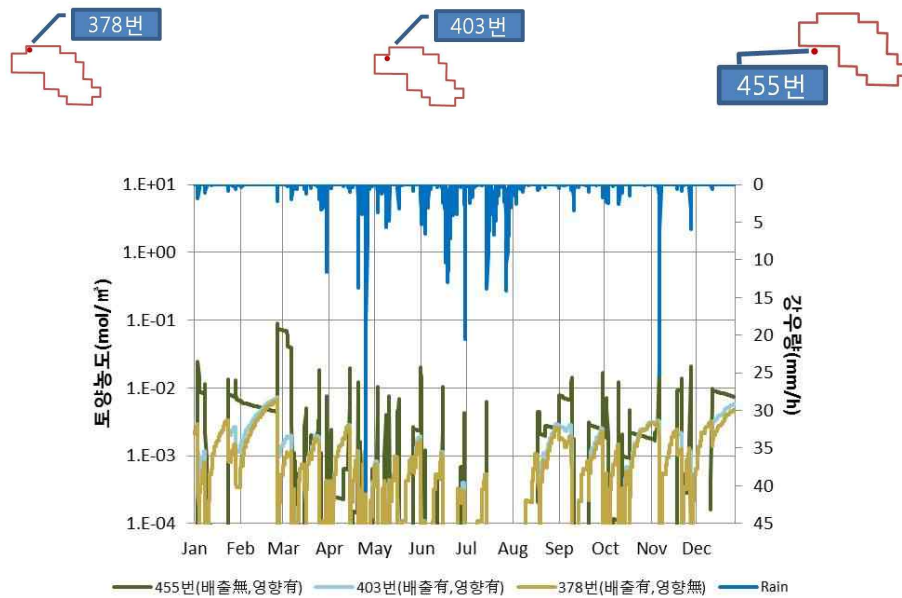
10) 그래프에서는 1×10^{-6} 이하의 값을 생략하였다.

로 감소하다가 강우사상 발생 시 급격한 감소가 발생한다. 저토의 농도는 일정 값에 수렴하여 큰 변화를 보이지 않았다(<그림 4-4>, <표 4-3> 참조).

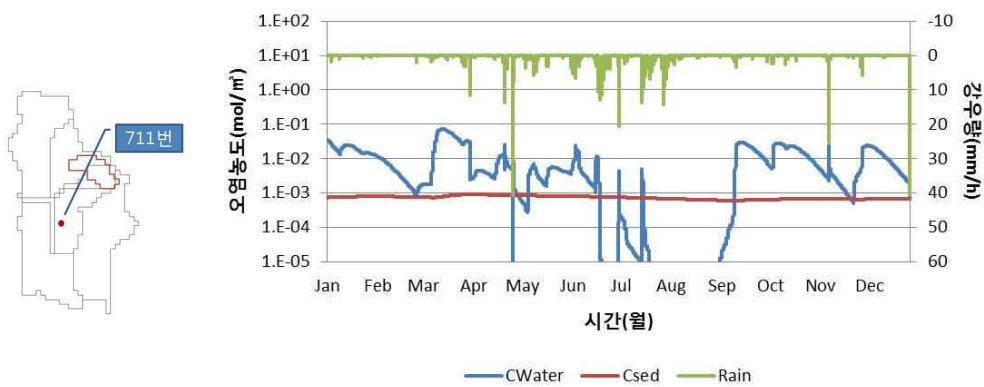
토양과 수체의 1년간의 농도는 강우사상에 의해서 큰 폭을 보이며 변화함을 알 수 있다.

<표 4-3> 3개년 토양, 수체, 저토의 1년 오염농도 최대값, 평균값.

지점	최대값(mol/m ³)	평균값(mol/m ³)
378	5.44×10^{-3}	2.60×10^{-7}
403	5.63×10^{-3}	8.28×10^{-7}
455	7.21×10^{-2}	1.49×10^{-9}
수체	5.55×10^{-2}	2.17×10^{-3}
저토	9.22×10^{-4}	7.49×10^{-4}



<그림 4-3> 1년 동안의 셀별 강우량, 토양 RDX농도 변화



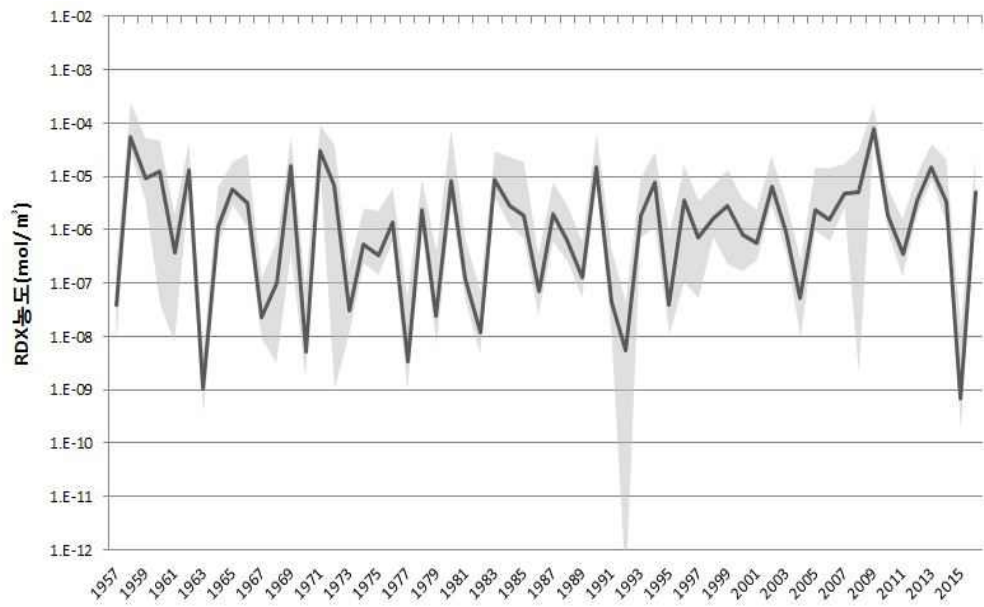
<그림 4-4> 1년 동안의 강우량, 수체, 저토 RDX농도 변화(711번)

각 매체별(배출량이 있는 토양, 배출량이 없는 토양, 수체, 저토)로 구분 후 60년간의 농도변화를 최대값, 평균값, 최소값으로 나타내었다. 최대값은 매년 가장 높은 값을 가지는 셀의 평균값이며, 최소값은 가장 낮은 값을 가지는 셀의 평균값이다. 토양, 수체, 저토 농도 그래프의 평균값의 변화는 통계적으로 상승이나 하강 추세를 보이지 않는다(<그림 4-5, 4-6, 4-7, 4-8> 참조). 이를 통해 매체 내 RDX의 축적 현상은 일어나지 않음을 알 수 있다. 배출량이 없는 토양은 있는 토양에 비하여 농도변화가 크며 상대표준편차¹¹⁾으로 나타내면 배출량이 없는 토양이 있는 토양의 2.15배에 달한다. 그 이유는 배출량이 있는 토양은 주기적인 화약물질의 배출로 인하여 비교적 높은 농도가 유지된 반면 없는 토양은 화약물질이 축적이 되다가 강우에 의하여 농도가 급격하게 낮아져서 농도변화가 크기 때문이다(<표 4-4> 참조).

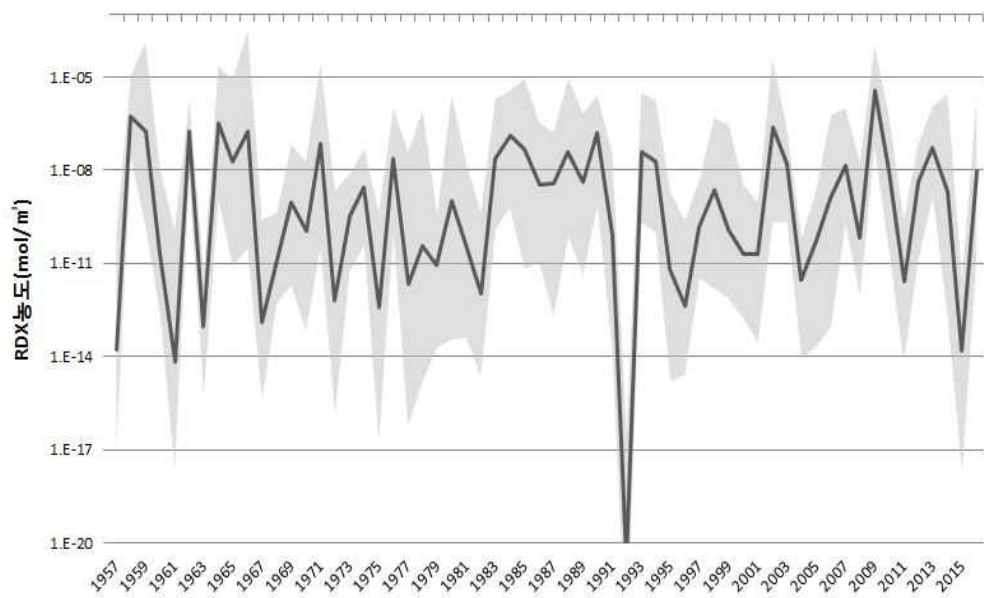
<표 4-4> 60년간 매체별 셀 평균값의 최대값, 평균값, 최소값.

	토양 (배출량 有)	토양 (배출량 無)	수체	저토
셀 개수	40개	40개	13개	13개
최대값(mol/m^3)	2.27×10^{-5}	5.67×10^{-8}	2.76×10^{-3}	7.50×10^{-4}
평균값(mol/m^3)	5.76×10^{-6}	2.92×10^{-10}	2.10×10^{-3}	4.00×10^{-4}
최소값(mol/m^3)	2.47×10^{-6}	4.69×10^{-13}	1.29×10^{-3}	2.29×10^{-4}
상대표준편차	223.81	481.80	42.99	13.25

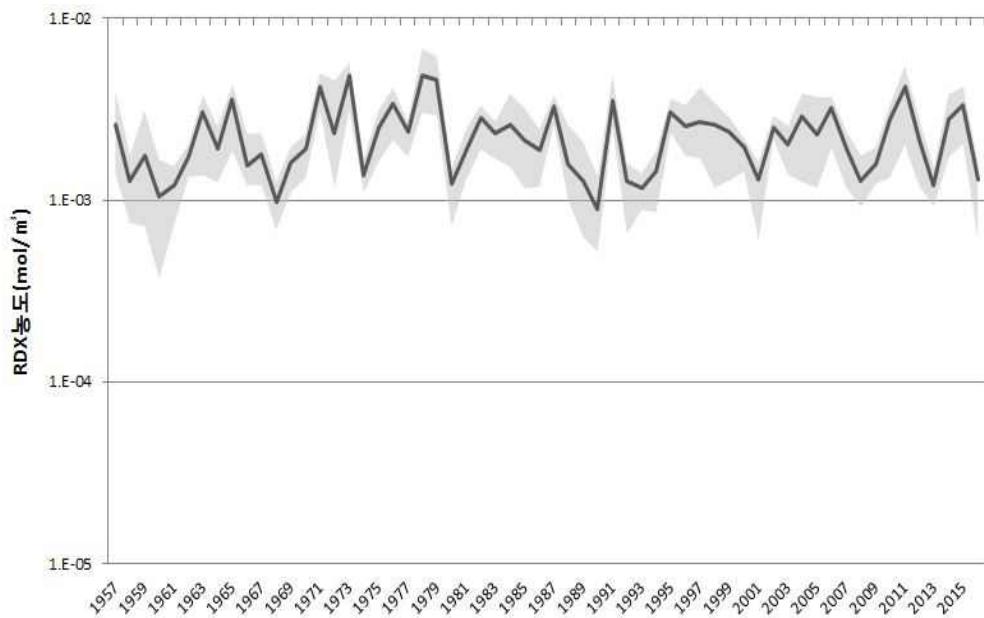
11) 상대표준편차(RSD : Relative Standard Deviation)란 표준편차를 평균으로 나눈 후 100을 곱한 수치로서 변동계수(CV : Coefficient of Variability)라고도 한다. 즉, 상대표준편차가 크다는 것은 표준편차가 평균에 비해 상대적으로 크다는 의미이므로 산포도가 큼을 의미하고 그렇지 않은 경우에는 산포도가 작음을 의미한다.



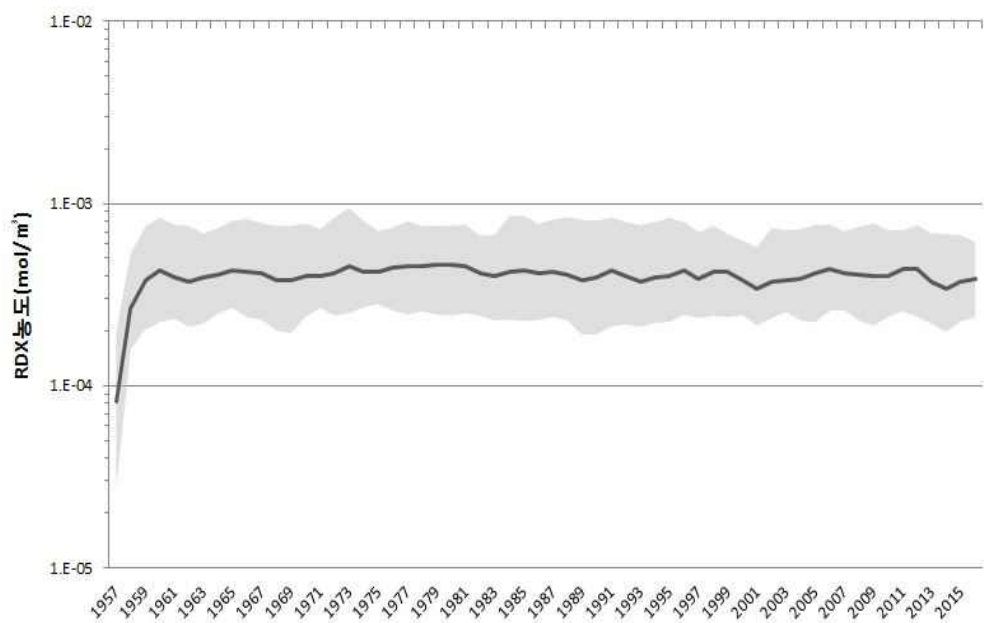
<그림 4-5> 60년 동안의 토양농도(배출량 有) 변화
(음영 : 각 년도 최대값-최소값 범위, 실선 : 평균값)



<그림 4-6> 60년 동안의 토양농도(배출량 無) 변화
(음영 : 각 년도 최대값-최소값 범위, 실선 : 평균값)



<그림 4-7> 60년 동안의 수체농도 변화
(음영 : 각 년도 최대값-최소값 범위, 실선 : 평균값)



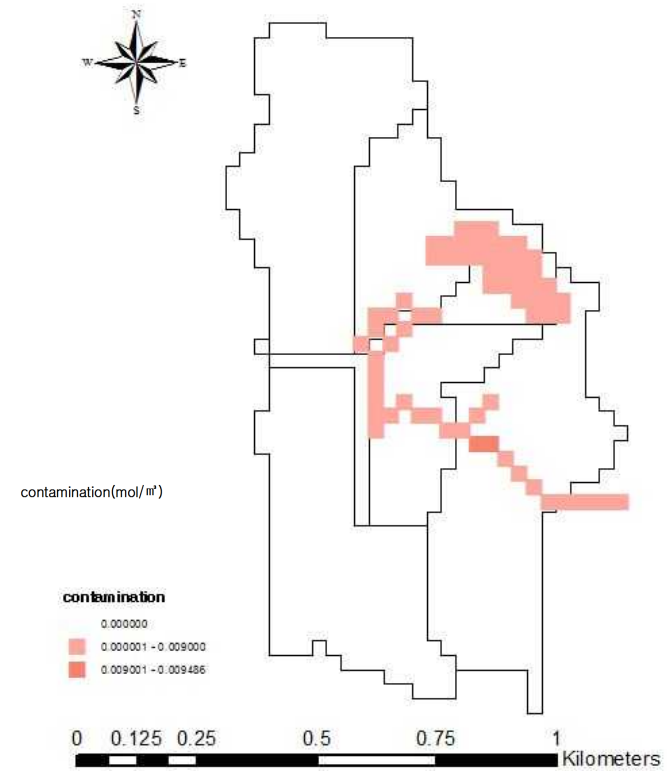
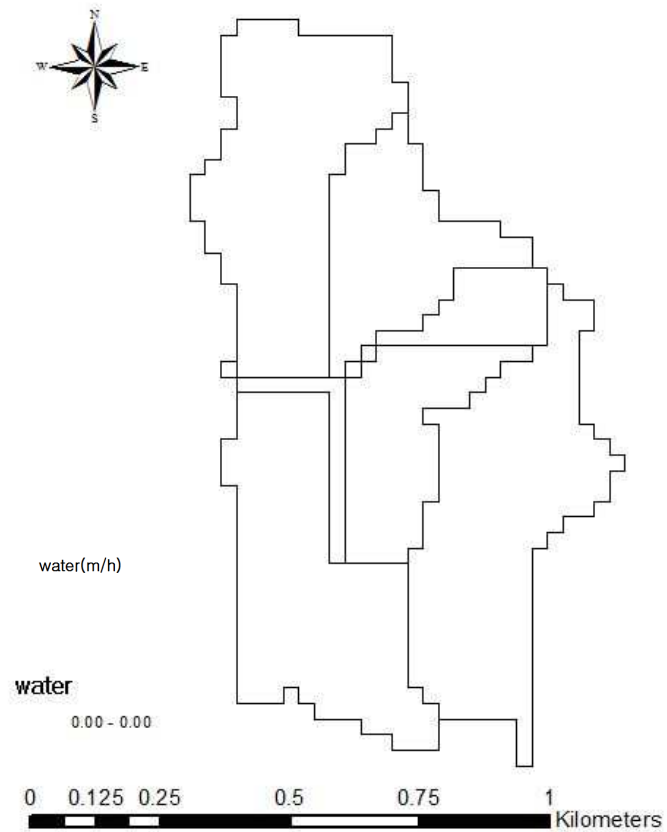
<그림 4-8> 60년 동안의 저토농도 변화
(음영 : 각 년도 최대값-최소값 범위, 실선 : 평균값)

단일시간 내 공간별 경로의 농도변화를 확인하였다. 피탄지 내 강우유출, 토사유실과 안월천의 이류에 의한 오염물질의 이동에 따른 토양과 수체의 농도별 변화는 강우사상에 영향을 받는다. 그리하여 시간기준은 60년의 평균 강우량과 가장 근접한 값을 가지고 있는 1990년도를 선정하였고, 강우량의 수준에 따라 4단계로 구분하였다. 첫째는 강우사상이 없는 경우, 둘째는 강우가 시작된 후, 누적강우량이 5mm이상인 경우, 셋째는 30mm이상인 경우, 마지막은 60mm이상인 경우이다(<표 4-5> 참조).

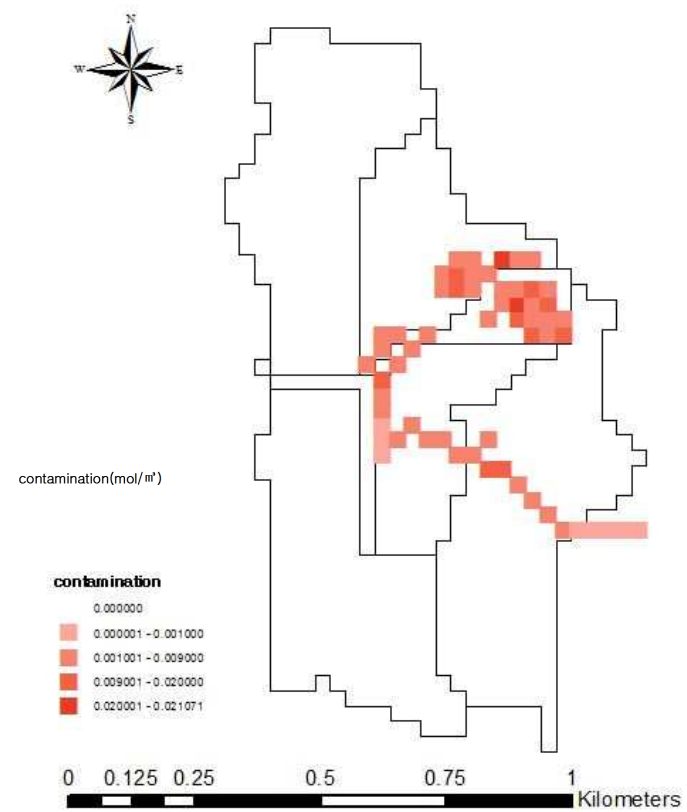
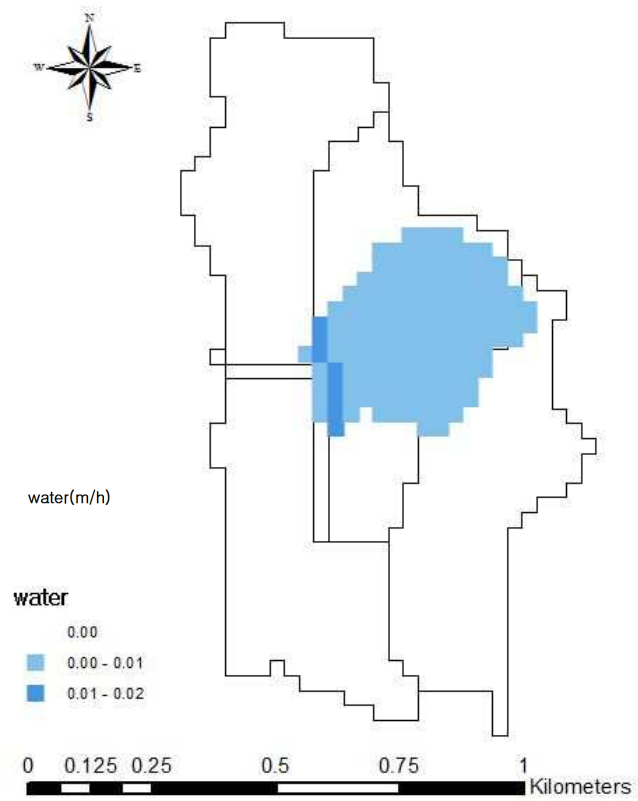
강우사상 분류기준대로 강우유출속도와 토양/수체 농도를 ArcMap를 이용하여 시각화 하였다. 강우량이 0mm일 때는 이전의 강우유출 및 이류에 의하여 토양과 수체가 오염이 되어 있으며, 토양배출지점에 농도가 높게 형성되어 있다(<그림 4-9> 참조). 누적강우량이 5.58mm 시점에는 강우에 의하여 배출은 일어나지 않으며, 흐름방향에 따라 경로가 중첩되는 지점에는 농도가 높게 유지되었다(<그림 4-10> 참조). 누적강우량이 32.127mm인 시점에는 배출지점의 농도가 현저히 낮아졌으며, RDX 배출지점보다 비교적 수체와 인접한 곳의 토양과 수체의 농도가 높아졌다(<그림 4-11> 참조). 강우량이 60.289mm인 시점에는 배출지점에 축적되었던 화약물질이 모두 강우에 의하여 유출된다(<그림 4-12> 참조). 결론적으로 강우에 따라 배출이 일어나지 않는 지점도 강우유출의 흐름에 따라 중첩되어 배출 지점보다 농도가 높아질 수 있으며, RDX는 수체 쪽으로 거동함을 알 수 있다.

<표 4-5> 강우사상 분류 기준.

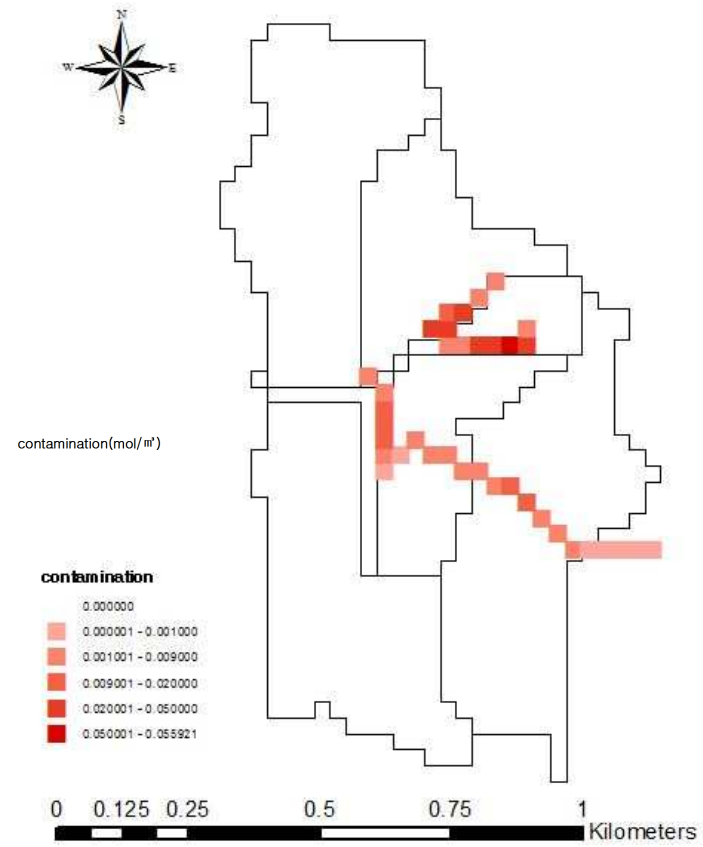
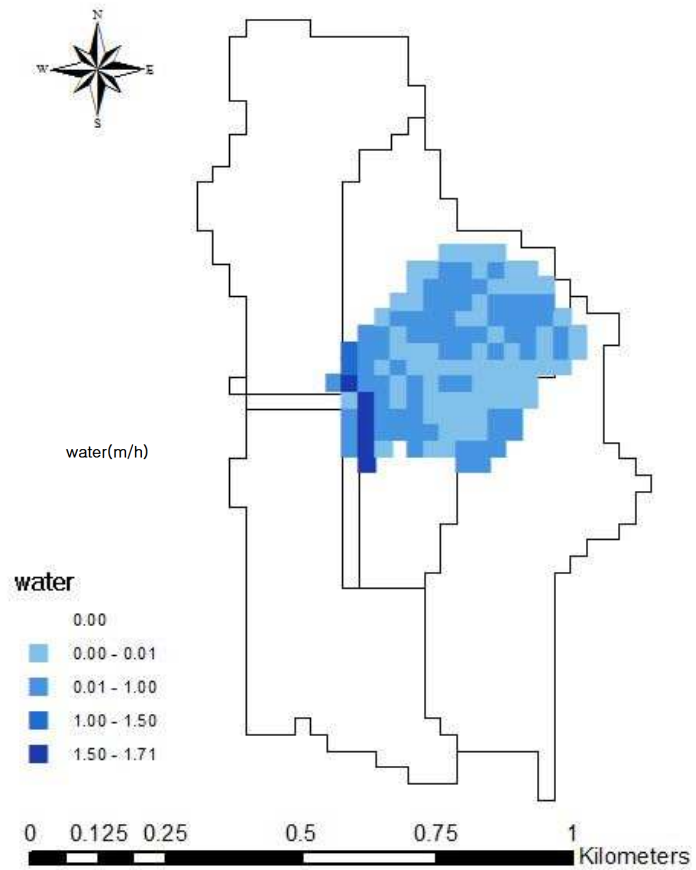
	0mm	5mm 이상	30mm 이상	60mm 이상
시간	4월25일03시	4월25일06시	4월25일09시	4월25일12시
강우량	0mm	5.58mm	32.127mm	60.289mm



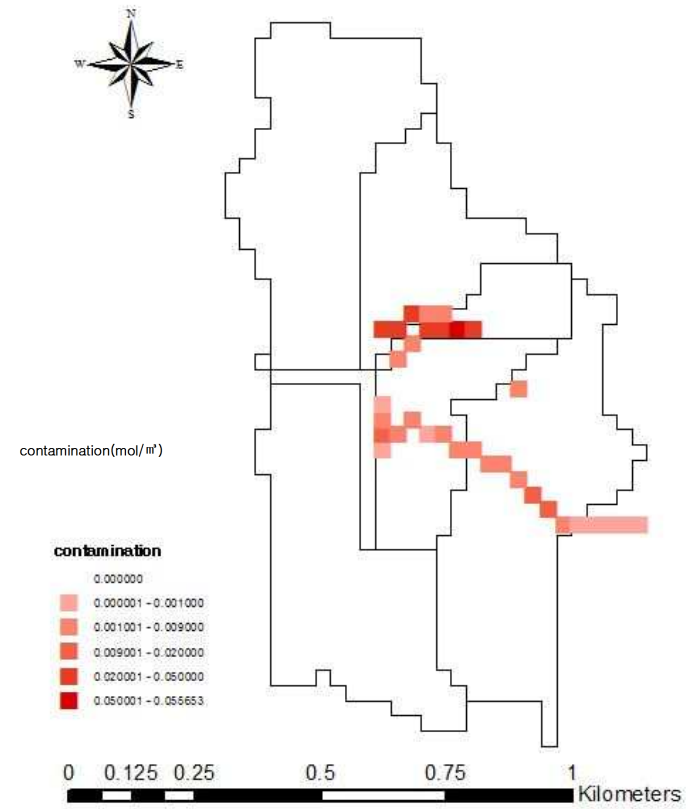
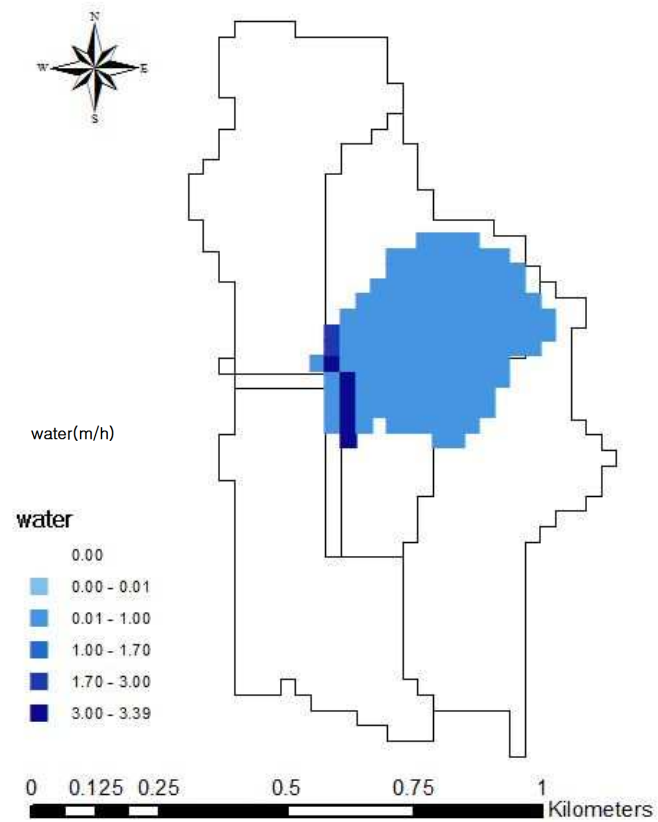
<그림 4-9> 경로별 강우유출속도(m/h), 토양/수체농도(mol/m³)의 분포(누적강우량 0mm)



<그림 4-10> 경로별 강우유출속도(m/h), 토양/수체 농도(mol/m³)의 분포(누적강우량 5.58mm)



<그림 4-11> 경로별 강우유출속도(m/h), 토양/수체 농도(mol/m³)의 분포(누적강우량 32.127mm)



<그림 4-12> 경로별 강우유출속도(m/h), 토양/수체농도(mol/m³)의 분포(누적강우량 60.289mm)

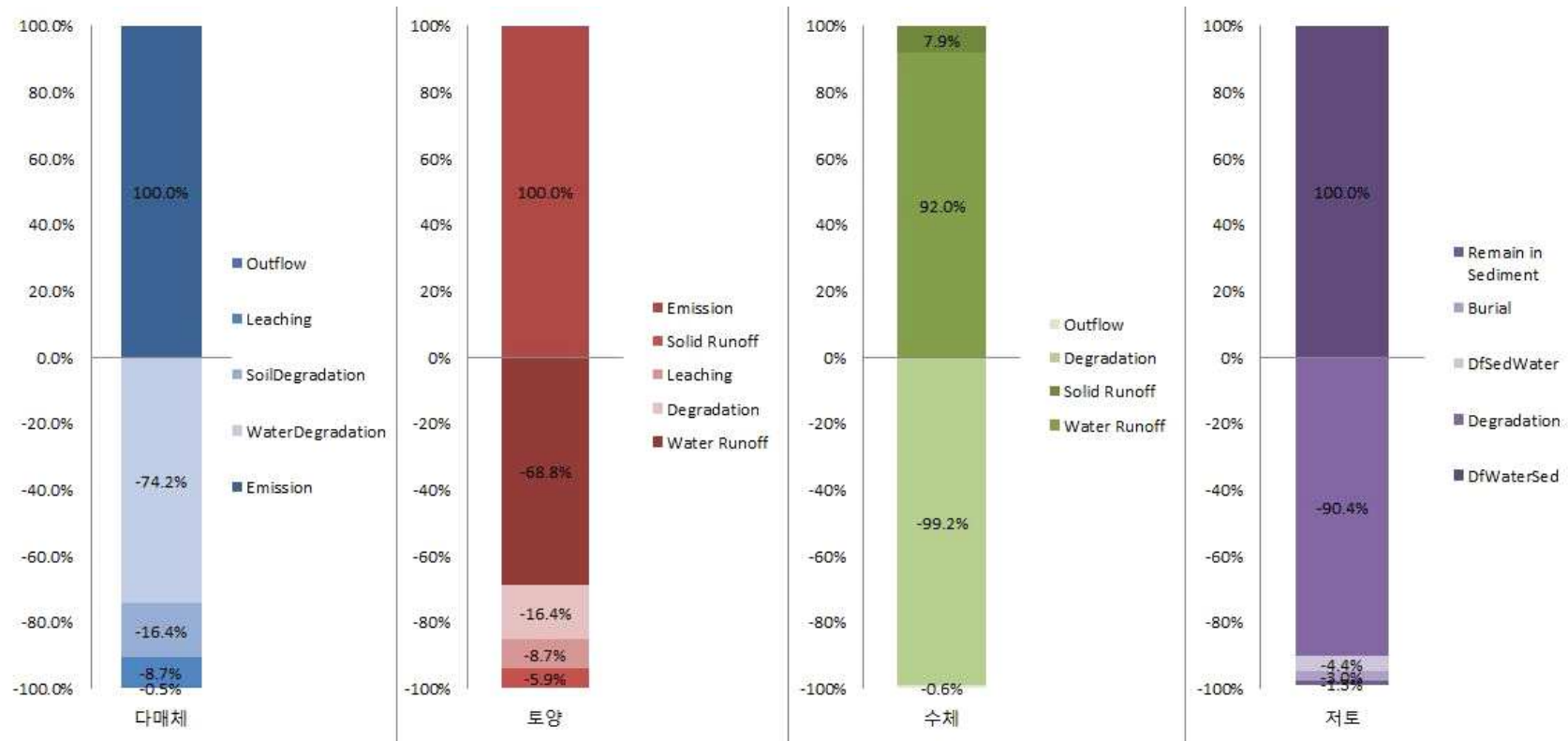
4. 60년간 다매체 내 RDX 유출·입 비율

60년간 다매체(토양, 수체, 저토)에서 일어나는 RDX 제거 기작의 총 누적량은 수체 내 분해>토양 내 분해>지하수 유출>이류 순이다. 전체 양 중 90.6%가 분해(수체 내 분해 74.2%, 토양 내 분해 16.4%)로 제거되었으며, 8.7%가 지하수로 유출되었다. 이는 대부분의 양이 토양과 수체 내에서 분해, 제거되거나 지하수로 이동함을 의미한다.

토양 내 RDX는, 강우유출>토양 내 분해>지하수 유출>토사유실 순으로 제거되었다. 68.8%가 강우유출 되었으며, 16.4%가 토양 내 분해되었다. 8.7%가 지하수 내로 유출되었고, 5.9%가 토사유실로 하천으로 유출되었다.

수체내의 RDX는 강우유출>토사유실>확산>재부유 순으로 유입되었으며, 토양으로부터 강우사상에 의하여 발생된 강우유출(92%)과 지표유출(7.9%)에 의하여 유입된 비율이 99%에 달한다. 확산과 재부유에 의하여 저토에서 수체로 이동한 비율은 무시할 수 있다. 수체 내 분해>이류>저토로의 확산>침강 순으로 제거되었으며, 제거량 중 수체 내 분해로 제거된 비율이 99%이며, 하천 하류로 흘러간 비율이 0.6%이다.

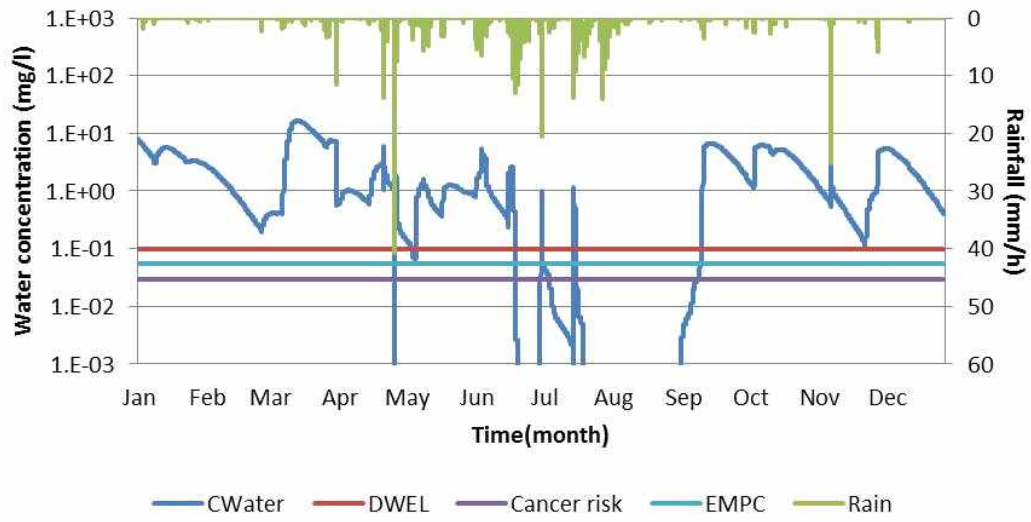
저토 내 RDX의 유입량 중에는 확산 > 침강순으로 유입된다. 제거량 중 저토 내 분해 > 수체로 확산 > 저토 아래 매장 > 저토 잔류 > 수체로 재부유 순으로 제거되며, 저토 내에서 분해에 의해 제거된 비율이 90.4%이며, 수체로 확산되는 비율이 4.4%, 저토 아래 매장되는 비율은 3%, 저토에 잔류한 비율과 수체로 재부유 되는 비율이 각각 1.3%를 차지한다(<그림 4-13> 참조).



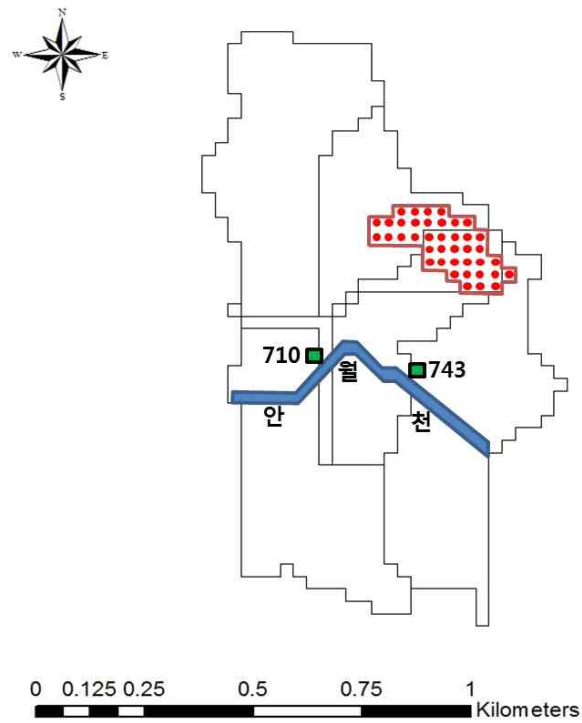
<그림 4-13> 다매체 내 RDX 유입(배출), 유출(제거)비율
 (DfSedWater : Diffusion Sediment to Water, DfWaterSed : Diffusion Water to Sediment)

5. 수체 농도와 RDX 건강권고치, EMPC와의 비교

임진강과 안월천의 합류지점의 구획별 농도변화를 보면 10개 구획 중 안월천과 임진강이 처음 합류하는 906번 셀의 최고농도는 2.18×10^{-2} mg/L이었다. 해당 농도는 EPA에서 지정한 화약물질에 대한 건강권고치 기준(DEWL : 0.1mg/L, cancer risk : 0.03mg/l)에 못 미치거나 근소하게 넘는 결과를 보았으며, 907번~915번 셀에서는 RDX가 검출되지 않았다. 이는 임진강의 큰 유량(1년간 $0.2 \sim 379.1 m^3/h$)에 비하여 수체 내 취수장 방향으로의 RDX 거동이 기여하는 정도가 미미하기 때문이다. 하지만 경기도에 위치한 다락대 포탄 사격장 유역의 생태 위해성 평가 결과 RDX의 생태최대 허용농도(EMPC : Ecological Maximum Permissible Concentration)는 0.056mg/L로 나타났으며(한국종합기술, 2009), 지천인 안월천의 RDX오염농도는 1년 중 약 9개월 이상 건강권고치와 EMPC를 초과하였다(<그림 4-14> 참조). 안월천 하류에는 천연기념물인 수달을 포함한 포유류 5종, 청둥오리 등 조류 14종, 잠자리 등 곤충 8목 19과 34종, 피라미 등 어류 41종의 서식 및 활동이 발견되었다(한국수자원공사, 2005). 안월천 하류에 서식하는 동물들은 하천 물을 섭취하거나 번식하는 과정에서 RDX에 직접적으로 노출될 수 있다. 따라서 피탄지 토양에서 강우유출과 토사유실로 인하여 안월천으로 흘러들어가는 곳에 오염저감 조치가 이루어진다면 좋을 것이다. 피탄지 토양에서 수체로 오염물질이 이동하는 지점은 모델링 과정을 통하여 710, 743 이상 2개 지점으로 확인되었다(<그림 4-15> 참조).



<그림 4-14> 안월천 RDX농도와 건강권고치, EMPC와의 비교



<그림 4-15> 수체로 오염물질이 유입되는 토양구획

V. 결 론

1. 결 론

본 연구의 목적은 첫째, 안월천 유역내의 피탄지 토양의 RDX 오염과 피탄지에서 유출된 RDX에 의해 인근 하천인 안월천과 임진강의 취수지역이 오염된 정도를 시공간의 함수로서 예측, 둘째, 피탄지에서 안월천으로 RDX의 이동경로를 파악하여 RDX의 이동저감을 위한 기초자료를 제공하는 것이다.

연구결과, 매체별 RDX 오염농도는 강우사상에 큰 영향을 받는다. 강우량이 많을수록 토양의 오염도는 낮아지며, 수체의 오염도는 높아지는 경향을 보인다. 그리고 강우유출과 하천의 이류 도중 토양과 수체 내에서 많은 양이 분해된다. 결국 배출량이 현재와 같이 일정할 때 토양, 수체, 저토 농도는 축적되는 경향이 없이 일정하며, 피탄지에 대한 오염정화활동은 부지를 다른 용도로 전환하지 않는 이상 불필요하다고 판단된다.

하지만 사격장 피탄지에서 안월천으로 흘러들어가는 RDX의 농도는 1년 중 9개월 이상 인체에 대한 건강권고치와 생태허용 최대농도(EMPC)를 초과하였다. 안월천 하류에 서식하는 동물들은 하천 물을 섭취하거나 번식하는 과정에서 RDX에 직접적으로 노출될 수 있다. 따라서 피탄지 토양에서 강우유출과 토사유실로 인하여 안월천으로 흘러들어가는 곳에 오염 저감 조치가 이루어진다면 좋을 것이다.

취수장 주변의 하천에는 RDX농도가 건강권고치를 초과하지 않아 주민의 식수 섭취에 대한 위험은 없는 것으로 판단된다. 또한 임진강에 서식하고 있는 어류의 섭취를 통한 RDX의 인체 노출이 위험이 될 수 있지만, RDX의 생체 축적의 가능성이 낮기 때문에 이 위험 또한 낮다. 그러나 만약 본 연구지가 아닌 다른 피탄지 주변에 안월천 규모의 지천이 있으며 그 주변에 주민이 거주하고 있다면 영향을 무시할 수 없을 것이라 판단되며, 본 연구에 개발된 모형과 평가방법이 적용될 수 있으리라 기대된다.

2. 연구의 한계와 추후 연구의 필요성

한계점은 국내사격장에는 배출량에 대한 조사가 미비하고 군사훈련의 특성상 배출량에 대한 정확한 반영이 힘들다는 것이다. 군남홍수조절지 환경영향평가서에서는 계절별 오염도 측정을 하였지만 짧은 시간 해상도로 주기적인 측정치가 부족하여 모델의 결과와 비교하기가 제한이 된다. 그리고 동일한 환경에서 측정하였는지 알 수 없으며 측정치간 차이가 커 예측치와의 통계적 검증도 어려웠다.

토양 제거 기작 중 지하수로의 침출이 8.7%로 큰 비율을 차지하기 때문에 지하수의 영향을 연구해 보는 것도 좋을 것으로 생각된다. 또한 포탄이 피탄지에 낙하하여 폭발되면서 기화되는 기작이 추가된다면, 포탄낙하에 따른 구덩이의 깊이와 오염도의 관계에 대한 연구가 진전된다면 토양의 오염농도를 정확히 반영할 수 있고, 신뢰할만한 모형이 만들어지리라 예상된다.

모형의 민감도 분석 또한 추가되어야 할 부분이다. 모형에서 예측치에 영향을 주는 요인은 강우, 온도, 배출량 등이 있다. 실측치에 영향을 주는 정도와 예측치에 영향을 주는 정도가 일치한다면 모형에 대한 신뢰도는 높아질 것이다.

■ 참고문헌

- 강신봉, 이태승, 최희재, 최윤철(1994), “공간자료의 처리를 위한 사분트리에 기반한 래스터자료와 벡터자료의 통합 GIS 모델”, 「한국지형공간정보학회지」, 2(1): 99-106.
- 경기도(2003), “임진강(1지구) 하천정비기본계획(설마천, 퇴골천, 사미천, 석장천, 백령천, 양원천, 죽대천, 차곡천, 옥계천, 황공천, 노동천, 안월천)”.
공효영, 이광표, 이종열, 김범준, 이아름, 배범한, 김지연(2012), “RUSLE 모델에 의한 군사격장 피탄지 토양유실량 평가: 토양 유실과 오염 화약물질 이동 상관성”, 「지하수토양환경」, 17(6): 119-128.
- 구자홍, 김진경, 박진호, 박헌진, 이재준, 전홍석, 황진수(2000), 「통계학」, 자유아카데미.
- 국방부(2002). “사격장 토양오염조사 및 오염확산 방지대책 연구”.
- 정인주, 이정민, 김상용, 이종출(2002), “DEM에 의한 지형인자 추출에 따른 격자크기의 영향에 관한 연구”, 「한국지형공간정보학회지」, 10(2): 67-75
- 김혁(2001), GIS와 기대평균농도(EMC)를 이용한 오염부하량 산정, 전남대학교 대학원 석사학위논문.
- 박석호, 배범한, 김민경, 장운영(2008), “국내 소규모 군사격장 복합오염물질(화약물질 및 중금속)의 분포 및 거동”, 「한국물환경학회지」, 24(5): 523-532
- 배범한, 박지은(2014), “경기도 북부지역 군용 사격장 토양에 존재하는 화약물질 분포 및 이동 특성 조사”, 「한국지반환경공학회」, 15(6): 17~29
- 연천군 종합민원과. (2015). “2015년 9월말 인구 및 세대현황”.
- 윤태훈(2011), 「응용수문학」, 청문각
- 윤혜인(2003), 댐 수체 내 화약물질의 거동 예측, 연세대학교 대학원 석사학위논문
- 한국종합기술(2009), 다락대사격장 유역 위해성 평가
- 한국수자원공사(2005). “군남홍수조절지 건설사업 환경영향평가서”.
- 환경부(2012). “표토의 침식 현황 조사에 관한 고시”.

- Abadin, H., Smith, C., Ingerman, L., Lladós, F. T., Barber, L. E., Plewak, D., Diamond, G. L.(2012), *Toxicological Profile for RDX*, Atlanta: Agency for Toxic Substances and Disease Registry.
- ACGIH.(2001), Threshold limit values for chemical substances and physical agents and Biological Exposure Indices, Cincinnati OH USA: American Conference of Governmental Industrial Hygienists.
- Ainsworth, C. C., Harvey, S. D., Szecsody, J. E., Simmons, M. A., Cullinan, V. I., Resch, C. T., and Mong, G. H.(1993), *Relationship between the leachability characteristics of unique energetic compounds and soil properties. Final Reprt, Project Order No. 91991800*, Fort Detrick, U.S : Army Bioremedial Research and Development Laboratory,
- Ariyaratna, T., Vlahos, P., Tobias, C., Smith, R.(2016), “Sorption kinetics of TNT and RDX in anaerobic freshwater and marine sediments: Batch studies”, *Environmental Toxicology and Chemistry*, 35(1): 47–55.
- Benoit Van Aken, Jong Moon Yoon, Jerald L. Schnoor.(2004), Biodegradation of Nitro-Substituted Explosives 2,4,6-Trinitrotoluene, Hexahydro-1,3,5-Trinitro-1,3,5-Triazine, and Octahydro-1,3,5,7-Tetranitro-1,3,5-Tetrazocine by a Phyto symbiotic Methylobacterium sp. Associated with Poplar Tissues(*Populus deltoides nigra* DN34), 70(1): 508–517.
- Berthe-Corti, L., Jacobi, H., Kleihauer, S., Witte, I.(1998), “Cytotoxicity and mutagenicity of a 2, 4, 6-trinitrotoluene (TNT) and hexogen contaminated soil in *S. typhimurium* and mammalian cells”, *Chemosphere*, 37(2): 209–218.
- Brannon, J. M., Pennington, J. C. (2002), *Environmental fate and transport process descriptors for explosives* (No. ERDC/EL-TR-02-10), Engineer Research and Development Center Vicksburg MS Environment LAB.
- Brown, L., Foster, G. (1987), “Storm erosivity using idealized intensity

- distributions”, *Transactions of the ASAE*, 30(2): 379–0386.
- Marine Corps Installations Command.(2013), *Range Environmental Vulnerability Assessment*, Marine Corps Air Station and Marine Corps Base Camp Pendleton
- Childress, J. R.(1970), A proposed concept for the rapid field design of protective structures.
- Cronshey, R.(1986), *Urban hydrology for small watersheds*. US Dept. of Agriculture, Soil Conservation Service, Engineering Division.
- Küçükardall, Y., Acar, H. V., Özkan, S., Nalbant, S., Yazgan, Y., Atasoyu, E. M., Danaci, M.(2003), “Accidental oral poisoning caused by RDX (cyclonite): a report of 5 cases”, *Journal of intensive care medicine*, 18(1): 42–46.
- Lyman, W.J., Reehl, W.F., Rosenblatt, D.H.(1982), Handbook of chemical property estimation methods: Environmental behavior of organic compounds. New York, NY: McGraw–Hill Book Company.
- Mackay, D., E. Webster, I. Cousins, T. Cahill, K. Foster, T. Gouin.(2001), *An introduction to multimedia models*, CEMC report no. 200102.
- Mark, A., Marek, P.(2009), *Hydraulic Design Manual, by Texas Department of Transportation (TxDOT)*, The Design Division (DES).
- Myers, T. E., Brannon, J. M., Pennington, J. C., Townsend, D. M., Davis, W. M., Ochman, M. K., Hayes, C. A., and Myers, K. F.(1998), *Laboratory studies of soil sorption/ transformation kinetics for explosives. Technical Report in preparation*, Vicksburg, MS, U.S.: Army Engineer Waterway Experiment Station.
- National Toxicology Program(NTP).(2002), Report on carcinogens 10th edn, US Department of Health and Human Services Public Health Service. National Toxicology Program.
- Pennington, J. C., Brannon, J.M.(2002), Environmental fate of explosives. *Thermochim Acta* 384:163–172.

- Pennington, J. C., Gunnison, D., Harrelson, D. W., Brannon, J. N., Zakikhani, M.(1999), *Natural attenuation of explosives in soil and water systems at Department of Defense sites* (No. WES/TR/EL-99-8), Army Engineer Waterways Experiment Station Vicksburg MS Environmental LAB.
- Pennington, J. C., Jenkins, T. F., Ampleman G. et al.(2002), *Distribution and fate of energetics on DOD test and training ranges: interim report 2*, Vicksburg, Miss, USA: US Army Corps of Engineers Engineer Research and Development Center.
- _____.(2006), *Distribution and fate of energetics on DOD test and training ranges: interim report 6*, Vicksburg, Miss, USA: US Army Corps of Engineers Engineer Research and Development Center.
- Renard, K. G., Foster, G. R., Weesies, G., McCool, D., Yoder, D.(1997), *Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) (Vol. 703)*, Washington, DC: US Government Printing Office.
- PHYSPROP.(2009), 1,3,5,- Trinitrohexahydro-1,3,5-triazine. Physical Properties Database. SRC, Inc. <http://www.syrres.com/what-we-do/product.aspx?id=133>. July 30, 2009.
- Pichtel, J.(2012), *Distribution and fate of military explosives and propellants in soil: a review*, Applied and Environmental Soil Science, 2012.
- Roehl, J. W.(1962), "Sediment source areas, delivery ratios and influencing morphological factors". *International Association of Scientific Hydrology*, 59: 202-213.
- Rosen, J. M., Dickinson, C.(1969), "Vapor pressures and heats of sublimation of some high-melting organic explosives". *Journal of chemical and Engineering Data*, 14(1): 120-124.
- Schoorl, M., Hollander, A., van de Meent D.(2015), SimpleBox 4.0 : A

Multimedia mass balance model for evaluating the fate of chemical substances.

- Swann, R.L., Laskowski, D.A., McCall, P.J.(1983), A rapid method for the estimation of the environmental parameters octanol/water partition coefficient, soil sorption constant, water to air ratio, and water solubility. *Res Rev* 85:17-28.
- Stone, W. J., Paletta, T. L., Heiman, E. M., Bruce, J. I., Knepshield, J. H.(1969), "Toxic effects following ingestion of C-4 plastic explosive", *Archives of internal medicine*, 124(6): 726.
- UNEP(2002), *Regionally based Assessment of Persistent Toxic substances, Europe(III)*. Central and North East Asia regional report(VII).
- US Environmental Protection Agency(1994), "EPA Superfund Record of Decision: Bangor Naval Submarine Base, Silverdale, WA," <http://www.epa.gov/superfund/sites/rods/fulltext/r1094107.pdf>, 1994.
- U.S. Army.(1980a), Environmental fate of RDX and TNT. Frederick, MD: U.S. Army Medical Research and Development Command. TR 81-538.
- U.S. Army.(1980b), Environmental fate studies on certain munition wastewater constituents: Phase II - Laboratory studies. Frederick, MD: U.S. Army Medical Research and Development Command. ADA099256.
- U.S. Army.(1984), Database assessment of the health and environmental effects of munition production waste products. Frederick, MD: U.S. Army Medical Research and Development Command, Fort Detrick. ADA145417.
- U.S. Army.(1985), Degradation of pink water compounds in soil -TNT, RDX, HMX. Technical report NATICK/TR-85/046. Aberdeen Proving Ground, MD: U.S. Army Toxic and Hazardous Materials Agency. ADA157954.

- U.S. Army.(1986), Water quality criteria for hexahydro-1,3,5-trinitro-1,3,5-triazine (RDX). Frederick, MD: U.S. Army Medical Research and Development Command.
- U.S. Army.(1987), Conventional weapons demilitarization: A health and environmental effects data base assessment: Explosives and their co-contaminants. Frederick, MD: U.S. Army Medical Research and Development Command. ADA220588.
- U.S. Army.(1993), Relationship between the leachability characteristics of unique energetic compounds and soil properties. Frederick, MD: U.S. Army Medical Research and Development Command. ADA267580.
- Walling, D. E.(1983), "The sediment delivery problem". *Journal of hydrology*, 65(1): 209-237.
- Walsh, M. E., Racine, C. H., Jenkins, T. F., Gelvin, A., Ranney, T. A.(2001), "Sampling for explosives residues at Fort Greely", 「Soil and Sediment Contamination」, 12(5): 631-645
- Walsh, M. R., Collins, C. M., Hewitt, A. D.(2008), *Energetic residues from blow-in-place detonation of 60-mm and 120-mm fuze high-explosive mortar cartridges* (No. ERDC/CRREL-TR-08-19), Engineer Research And Development Center Hanover NH Cold Regions Research And Engineering LAB.
- Walsh, M. R., Walsh, M. E., Collins, C. M., Saari, S. P., Zufelt, J. E., Gelvin, A. B. and Hug, J. W.(2005), *Energetic Residues from Live-Fire Detonations of 120-mm Mortar Rounds* (No. ERDC/CRREL TR-05-15), Engineer Research And Development Center Hanover NH Cold Regions Research And Engineering LAB.
- W. H. Wischmeier, D. Smith. (1978). *Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning*, United States Department Of Agriculture.

부록 1. 식생피복인자 값(환경부, 2012)

토지 이용	식생 및 작물	식생피복인자 값(C)
나지		1.00
논	벼	0.10
밭 - 단작	옥수수	0.31
	밭벼, 참깨	0.34
	조, 율무, 고랭지채소	0.40
	고추	0.32
	콩	0.29
	담배, 감자, 들깨, 팔	0.30
	고구마, 땅콩	0.18
밭 - 2기작	보리-고추	0.19
	보리-콩, 호밀-콩	0.18
	보리-고구마	0.10
	호밀-참깨	0.20
초지	잔디 (95~100% 피복)	0.003
	잡초 (95~100% 피복)	0.01
	잔디 (80%~95% 피복)	0.01
	잡초 (80%~95% 피복)	0.04
	잔디 (40%~80% 피복)	0.04
	잡초 (40%~80% 피복)	0.09
	잔디 (20%~40% 피복)	0.1
	잡초 (20%~40% 피복)	0.2
	잔디 잡초 (20% 이하 피복)	0.3
산림	95% 이상 피복	0.003
	80~95% 피복	0.01
	60~80% 피복	0.03
	40~60% 피복	0.10
	20~40% 피복	0.15
	20% 이하 피복	0.30
과수원	지면 피복도 40% 이하	0.09
	지면 피복도 40% 이상	0.05

출처 : 환경부, 2012

부록 2. 임진강과 안월천 합류지점 오염농도의 EPA건강권고치간의 비교
(1990년 기준)

구 획	평균 값(mg/l)	최대 값(mg/l)
906	3.64×10^{-3}	7.56×10^{-3}
907	1.22×10^{-3}	3.15×10^{-3}
908	5.32×10^{-4}	1.51×10^{-3}
909	2.73×10^{-4}	9.39×10^{-4}
910	1.61×10^{-4}	6.47×10^{-4}
911	1.60×10^{-4}	6.44×10^{-4}
912	1.52×10^{-4}	6.36×10^{-4}
913	1.52×10^{-4}	6.32×10^{-4}
914	1.49×10^{-4}	6.27×10^{-4}
915	1.49×10^{-4}	6.24×10^{-4}

물 질 명	RfD (mg/kg/d)	DWEL (mg/L)	mg/L at 10^{-4} cancer risk	암발생 분류
RDX	0.03	0.1	0.03	C급

출처 : 환경부, 2012

Abstract

Prediction of Surface Water Contamination with RDX Trasported from Soil in a Neighboring Firing Range

Park Jung Tae

Department of Environmental Planning

Environmental Management Major

The Graduate School of Environmental study

Seoul National University

Recently, pollution from gunpowder due to shell shootings at military drilling sites has raised various environmental concerns. RDX, a predominant organic compound used as explosives, may flow into soil either from incomplete oxidation at the moment of impact or from unexploded blind shells. During rainfall, these chemical pollutants accumulated in the soil profile may be dissolved into water, or adsorbed onto eroded soil particles, and transported to rivers, harming the neighboring ecosystems including soil, aquatic microorganisms, animals and plants.

The purpose of this study is to predict the contamination level of RDX in the soil area of the firing range zone near Anwol river

watershed, the study site, and the intake area, Anwol river and Imjin river, as a function of time and space. It also aims to identify the transportation route of RDX from the firing range to Anwol river, thus providing basic data for deterring RDX transportation into the rivers.

In this study, a multimedia model was developed to predict the variation of RDX contamination by rainfall. The range of the medium was limited to soil, water, and sediment, and excluded the atmosphere, taking into account the physical and chemical properties of RDX with low vapor pressure and low Henry's constant.

The analysis of the prediction results of the model was conducted in five steps. First, we analyzed the relationship between emission and rainfall conditions and pollutant concentrations by comparing the annual changes in the concentrations of three soils, which were classified according to the presence or absence of discharge and the influence of surrounding cells. Second, we examined the tendency of the change in pollutant concentrations over the past 60 years by identifying the maximum, average, and minimum values of the concentration levels in soil, water, and sediment. Third, the rainfall runoff velocity and the distribution of RDX concentration in soil and water were analyzed according to rainfall events. Fourth, the inflow and outflow rate of RDX in whole media and single medium sample was analyzed for the past 60 years, along with the major removal mechanisms. Finally, the pollutant levels of the waters of 10 compartments, including the last section of the Imjin River affecting the water intake, was compared with the environmental standard for RDX.

The main findings of the study are as follows: First, RDX pollution concentration by media was influenced by rainfall events. With increasing rainfall, pollution concentration of soil tended to decrease while that of water tended to increase. Second, RDX concentrations in soil, water, and sediment did not tend to accumulate over the past 60

years. Third, RDX that flows into Anwol River from the site of the firing range can have harmful effects on the river ecosystem. Fourth, due to the large discharge volume of Imjin river, the impact of RDX on water around the water intake area may be low.

It is expected that if there are rivers of similar size to the Anjung River in the vicinity of other firing ranges and the inhabitants are in the vicinity of them, the impacts will not be negligible and the models and evaluation methods developed in this study can be applied.

keywords : RDX, firing range, Soil erosion, Water runoff

Student Number : 2015-24823